



KATEDRA TEXTILNÍCH A JEDNOÚČELOVÝCH STROJŮ

2013

Bc. Jakub Mišák

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství

Obor: 2302 T010 Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření: Textilní stroje

Zařízení na ovíjení uzavřených rámců páskou z uhlíkových vláken

Device for winding closed frames using carbon fibers tape

KTS-M258

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.

Konzultant diplomové práce:

Ing. Rudolf Šrámek

Rozsah práce a příloh

Počet stran	63
Počet tabulek	4
Počet obrázků	36
Počet příloh	7

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 24.5. 2013

Podpis:

.....

Jakub Mišák

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. Applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and consultant.

Date: 24.5. 2013

Signature:

.....

Jakub Mišák

Poděkování

Předně bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jaroslavu Beranovi, CSc. za cenné rady a odborné vedení. Dále děkuji Ing. Rudolfu Šrámkovi z firmy VÚTS za četné konzultace a vstřícný přístup. V neposlední řadě děkuji své rodině za neskonalou trpělivost a podporu po celou dobu mého studia.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem zařízení pro ovíjení uzavřených ráků páskou z uhlíkových vláken. Cílem práce je ověření možnosti využití standardních cívek s uhlíkovými pramenci, bez nutnosti přesoukávání na menší rozměr. Část práce se zabývá prostorovými analýzami, které stanovují využitelný prostor pro umístění cívek. Hlavní oddíl práce se pak věnuje tvorbě variant a konstrukci konkrétní varianty včetně držáků cívek a naváděcích ústrojí. Návrh zařízení i prostorové analýzy jsou tvořeny pomocí programu PTC Creo Parametric 2.0. Deformační analýzy v závěru práce využívají softwaru PTC Creo Simulate 2.0. Dimenzování a kontrola kritických míst vychází z generátorů aplikace Autodesk Inventor Professional 2013. Závěr práce obsahuje vizualizaci možného budoucího řešení, zahrnující svařované rámy pro uchycení navrhnutého zařízení a robotickou manipulaci s ovíjeným jádrem.

Klíčová slova

ovíjení, uhlíková vlákna, prostorová analýza, metoda konečných prvků, konstrukce, vizualizace

Abstract

The subject of this thesis is the design of the device for winding closed frames using carbon fibers tape. The aim of this thesis is to check and verify whether the standard spools with the carbon fibers can be used without the necessity of previous winding to the spools of a smaller dimension. Part of this thesis is devoted to the space analysis to determine the space useable for location of the spools. The main part of this thesis deals with creation of several version and design one of them inclusive spool holders and guiding devices. The proposal of the device and the space analysis have been made in the PTC Creo Parametric 2.0 software. Deformation analysis in the end of this thesis use software PTC Creo Simulate 2.0. Sizing and checking of the critical points is based on application generators in Autodesk Inventor Professional 2013. Conclusion of this thesis contains visualization of possible future solution including welded frames for attachment of the proposed device and the robotic manipulation of the winded core.

Key words

winding, carbon fibers, space analysis, finite element method, design, visualization

Obsah

Úvod	9
1 Polymerní kompozitní materiály s vyztužujícími vlákny.....	10
1.1 Paradoxy kompozitních materiálů	10
1.1.1 Paradox pevného materiálu	10
1.1.2 Paradox vláknité struktury	11
1.1.3 Paradox délky zatížení	11
1.1.4 Paradox kompozitního materiálu	11
1.2 Vyztužující vlákna	11
1.2.1 Skleněná vlákna	11
1.2.2 Aramidová vlákna	12
1.2.3 Uhlíková vlákna.....	12
1.2.4 Přírodní vlákna.....	13
1.2.5 Porovnání vláken	14
1.3 Matrice	14
1.3.1 Termosetové matrice	15
1.3.2 Termoplastické matrice	15
1.4 Zpracování kompozitů.....	15
1.4.1 Výroba polotovarů s termosetovou matricí	15
1.4.2 Výroba polotovarů s termoplastickou matricí	16
1.4.3 Výroba kompozitů s termosetovou matricí.....	16
1.4.4 Výroba kompozitů s termoplastickou matricí	18
1.5 Použití.....	19
1.5.1 Použití uhlíkových kompozitů.....	19
1.6 Recyklace.....	21
2 Metody ovíjení a splétání	22
2.1 Splétání.....	22
2.1.1 2D splétání	22
2.1.2 3D splétání	23
2.2 Ovíjení	24
2.2.1 Ovíjení se statickým jádrem	24
2.2.2 Ovíjení s rotujícím jádrem	27
3 Požadavky na zařízení.....	29
3.1 Rám a jeho zatěžování	29
3.2 Požadavky na ovin	30

3.3	Cívky s uhlíkovými vlákny	30
4	Volba technologie.....	32
5	Prostorová analýza	33
5.1	Pohyb rámu v tečném směru	33
5.2	Pohyb rámu s povoleným odklonem	34
5.3	Pohyb 2D průmětu rámu.....	34
5.4	Porovnání pracovních prostorů	35
6	Konstrukce zařízení.....	38
6.1	Požadavky na rychlost stroje.....	38
6.2	Rozmístění cívek.....	39
6.3	Uložení prstence s rotujícími cívkami	39
6.4	Konstrukce držáků cívek.....	41
6.5	Orientace zařízení	45
6.6	Konstrukce naváděcího ústrojí.....	45
6.7	Deformační analýza rotujícího prstence	47
6.7.1	Namáhání prstence	47
6.7.2	Analýza standardního prstence	48
6.7.3	Analýza upraveného prstence	49
6.8	Výpočet životnosti uložení prstence	50
6.9	Konstrukce podélné soustavy	51
6.10	Volba pohonů	53
6.10.1	Pohon rotujících prstenců.....	55
6.10.2	Pohon podélné soustavy.....	56
6.10.3	Kontrola ozubeného převodu	56
6.10.4	Kontrola řemenových převodů	57
6.11	Průběh pramenců naváděcím ústrojím.....	57
7	Vizualizace budoucího zařízení.....	59
8	Závěr	60
	Použitá literatura	61
	Seznam příloh	63

Úvod

Polymerní kompozitní materiály v dnešní době nabývají na stále větším významu. Růst zaznamenávají zejména kompozity z uhlíkových vláken. S klesající cenou tak tyto materiály postupně přecházejí z letectví a kosmonautiky do běžné průmyslové praxe. Hlavní důvod jejich zavádění spočívá v pevnosti překonávající ocel a zároveň násobně nižší hustotě. Příchod nových materiálů ale vyžaduje i odlišné technologie pro jejich aplikaci.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem zařízení na ovíjení uzavřených rámu páskou z uhlíkových vláken. Cílem je nalezení vhodného konstrukčního řešení pro ovíní základního jádra dle požadavků zadavatele. Konstrukce zařízení vychází z jednoho konkrétního rámu, ale uvažuje se i možnost snadného přechodu na jiný typ rámu obdobné velikosti. Jedním ze záměrů práce je ověřit, zda lze použít standardní velikosti cívek, které jsou dány historickým vývojem, především z leteckého průmyslu, a případně nalézt maximální použitelnou velikost cívek pro eventuelní převíjení. Aplikací standardních cívek s uhlíkovými vlákny se vyhneme operaci přesoukávání, která prodražuje výrobu a zbytečně namáhá uhlíková vlákna.

Zavedení nových materiálů dále otevírá nové možnosti a odstraňuje stávající problémy. Úspěšnou aplikací se získá rám o vysoké tuhosti, odolností vůči korozi a zároveň bude snížena jeho hmotnost. Použití uhlíkových vláken sebou nese určitá specifika v konstrukční fázi výrobku. Pro úplné využití schopností materiálu je nutné provést důkladně analýzu zatížení a navrhnout optimální směr kladení vláken. Samotná tuhost rámu není dána pouze orientací vláken, ale i počtem vrstev. Pevnostní analýzy rámu nejsou cílem této diplomové práce, a proto smysl kladení a počet vrstev vychází z předběžných požadavků zadavatele.

Nově navrhnuté zařízení představuje pouze první fázi řešení tohoto komplexního problému. Bude sloužit především pro ověření teoretických poznatků a předpokladů. Jedná se zejména o dokonalost kladení vláken, účinnost naváděcích ústrojí a o případnou nutnost použití doplňkových technologií pro zlepšení výsledků. Konstrukce tak byla provedena s ohledem na možné změny ve sklonu kladení uhlíkových pásek a s ohledem na tvarovou proměnlivost rámu, což se projevuje zejména nutností použití více individuálních pohonů pro snadnou aplikaci změn.

1 Polymerní kompozitní materiály s vyztužujícími vlákny

Kompozitní materiály, zejména vyztužované polymery, zažívají v současné době velký rozmach. Kombinují vlastnosti různých materiálů a vytvářejí nové s naprosto odlišnými vlastnostmi. Při detailnějších pohledech na strukturu kompozitů lze rozeznat podobné struktury, které nalézáme v přírodě např. u vlny merino či bambusových stonků. Člověk tedy využívá synergických účinků různých materiálů, stejně jako příroda [1].

1.1 Paradoxy kompozitních materiálů

Rozvoj vlákenných kompozitů je umožněn díky čtyřem paradoxům materiálu [1].

1.1.1 Paradox pevného materiálu

„Skutečná pevnost materiálu je podstatně nižší než pevnost vypočítaná teoreticky.“ [1] Musíme také rozlišovat, zda se jedná o vlákna či kompaktní tělesa. U tradičních materiálů jako ocel nebo hliník je situace řádově příznivější než u plastů. Modul pružnosti se u oceli, hliníku a skla zásadně nemění od teoretické hodnoty. Oproti tomu se například u polyetyleny modul pružnosti od teoretické hodnoty pohybuje na třetině u vláken a na méně než setině u kompaktní hmoty. Obdobná situace panuje i u meze pevnosti v tahu viz tabulka 1.

Tabulka 1: Porovnání teoretických a experimentálně zjištěných hodnot [1]

Materiál	Modul E [N·mm ⁻²]			Mez pevnosti v tahu [N·mm ⁻²]		
	Teoretický	Naměřený		Teoretická	Naměřená	
		Vlákno	Kompaktní hmota		Vlákno	Kompaktní hmota
Polyetylen	300 000	100 000 (33%)	1 000 (0,33%)	27 000	1 500 (5,5%)	30 (0,1%)
Polypropylen	50 000	20 000 (40%)	1 600 (3,2 %)	16 000	1 300 (8,1%)	38 (0,24%)
Polyamid	160 000	5 000 (3%)	2 000 (1,3%)	27 000	1 700 (6,3%)	50 (0,18%)
Sklo	80 000	80 000 (100%)	70 000 (87,5%)	11 000	4 000 (36%)	55 (0,5%)
Ocel	210 000	210 000 (100%)	210 000 (100%)	21 000	4 000 (19%)	1 400 (6,67%)
Hliník	76 000	76 000 (100%)	76 000 (100%)	7 600	800 (10,5%)	600 (7,89%)

1.1.2 Paradox vláknité struktury

„Materiál ve formě vlákna má mnohonásobně vyšší pevnost než stejný materiál v kompaktní formě. Čím je vlákno tenčí, tím je jeho pevnost vyšší.“ [1] V praxi se většina vláken vyrábí od průměru 14 μm . Se zmenšováním průměru vláken totiž dochází ke zdravotním rizikům pro člověka, protože menší vlákna snadno proniknou do plic a mohou být karcinogenní.

1.1.3 Paradox délky zatížení

„Čím kratší je zatěžovaná část jednotlivého vlákna, tím vyšší je jeho naměřená pevnost.“ [1] Tento poznatek vychází z menšího množství poruch na kratším úseku. U kompozitů se snažíme o rovnoměrné rozložení vláken v matrici. Tím dosáhneme délky působení zatížení blížíící se k nule, což lépe rozloží napětí, poruchy se projeví méně a pevnost vláken je tak lépe využita.

1.1.4 Paradox kompozitního materiálu

„Kompozitní materiál jako celek může převzít napětí, které by jeho slabší složku porušilo. Od pevnější složky kompozitu může převzít vyšší podíl její teoretické pevnosti, než kdyby byla namáhána samostatně.“ [1]

1.2 Vyztužující vlákna

Plasty vyztužené vlákny využívají převážně uhlíková, skleněná a aramidová vlákna, v malém měřítku i vlákna přírodní. Jejich spojení se provádí matricí z reaktoplastů či termoplastů, přičemž termoplastické tvoří desetinu výroby, ale jejich podíl postupně roste. Termoplastická matrice se používá hlavně v kombinaci se sekanými vlákny, u kterých je možné použít tradiční metody zpracování plastů.

1.2.1 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna se nejčastěji vyrábí tenká 3,5-24 μm . Výroba probíhá tažením z roztavené skloviny přes trysky z platinové slitiny. Při výtoku z trysek dosahuje průměr vlákna hodnoty 2 mm. Samotné navíjení vláken je spojeno s kalibrací a dochází při něm až k 40 000 násobnému prodloužení. Během tažení se nanáší na vlákna lubrikace, která je chrání a zlepšuje jejich vlastnosti při dalším zpracování. Největší objem produkce skleněných vláken tvoří výroba tzv. E-vláken, která představují 90% výroby a patří mezi vynikající izolanty.

Vlákna se vyrábějí ve formě pramenců, rohoží, tkanin z pramenců, tkanin z vláken a ve formě dlouhých i krátkých sekaných vláken. Tkaniny se tkají v různých

vazbách a často se kombinují i s jinými materiály. Mezi dalšími možnostmi zpracování patří trojrozměrné tkaniny a pleteniny.

Skleněná vlákna patří mezi materiály izotropní. Jejich modul pružnosti je obdobný jako u hliníku a pevnost v tahu podstatně větší než u oceli. Netrpí viskoelastickým chováním jako vlákna syntetická, protože jejich mez průtažnosti se pohybuje kolem 3% a deformace je téměř elastická. Tepelná odolnost bez snížení hodnoty mechanických vlastností dosahuje 250°C a tepelná vodivost je podstatně nižší než u kovů. Skleněná vlákna patří mezi nehořlavé materiály s nízkou teplotní délkovou roztažností.

1.2.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou na bázi lineárních organických polymerů. Výroba probíhá spřádáním z vysokoviskozního roztoku v kyselině sírové. Jednotlivá vlákna se následně několikrát propírají, neutralizují a opatřují aviváží. Vyrábějí se v několika druzích s různými mechanickými vlastnostmi.

Obdobně jako u vláken skleněných jsou k dispozici ve formě pramenců, přízí, tkanin a povrchových rohoží. Do vyztužených plastů míří pouze 2% výroby, ostatní nacházejí uplatnění v brzdových a třecích obloženích, výztužích do pneumatik, balistických aplikacích a světlovodných kabelech.

Aramidová vlákna představují nejlehčí vyztužující vlákna. Silně anizotropní vlastnosti v kombinaci s výrazně nižší pevností v tlaku než tahu posunují uplatnění hlavně do aplikací s převážně tahovým namáháním. Vlákna absorbují vlhkost, která negativně ovlivňuje spojení s matricí, ale i pevnost samotného vlákna. V důsledku působení záření s vysokou energií, např. UV záření, dochází ke znatelnému poklesu pevnosti. Ve formě kompozitu odolávají až 300°C, nedochází k jejich tavení a jsou vhodné pro ochranné obleky. Adheze s matricí bývá nižší než u ostatních vláken a vytvrzené díly s aramidovými vlákny se obtížně obrábějí.

1.2.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se vyznačují vysokou pevností, tuhostí a nízkou tažností. Obsahují více než 90% uhlíku a mají průměr 5 až 10 μm . Surovinou pro jejich výrobu může být celulóza, polyakrylonitril (PAN) nebo smola. Z celulózy se vyrábějí především izolační materiály z důvodu nižší kvality vláken. Vlákna ze smoly představují malý podíl výroby (označují se HM a HT) a tak největší část připadá na vlákna z PAN, považována za standardní vlákna.

Průmyslová výroba probíhá především dvěma způsoby. První využívá PAN jako prekruzor. Ten je dloužen, následně teplotně stabilizován, karbonizován v inertní

atmosféře a poté dochází k povrchovým úpravám. Pro vlákna s vysokým modulem pružnosti v tahu, ale nižší pevností, může být zařazen další stupeň grafitizace. Druhý způsob využívá suroviny bohaté na uhlík např. smoly a dehty. Spočívá ve spřádání z taveniny, stabilizaci a následné karbonizaci. Vlákna mají vysoký modul pružnosti v tahu, ale nižší pevnosti oproti vláknům z PAN. Opět může následovat třetí stupeň žíhání.

V současné době patří mezi hlavní producenty uhlíkových vláken USA, Japonsko a Evropa. Výroba v roce 2004 takřka dvojnásobně převyšovala poptávku. Polovina produkce mířila do průmyslových aplikací, třetina do letectví a šestina do sportovních potřeb. [1] Vlákna se zpracovávají do pramenců, které můžeme dále tkát, a označují se podle počtu vláken. Pramence do 24 000 vláken se méně smyčkují, snadněji tkají a lépe propojují s matricí. Oproti tomu pramence s větším počtem vláken umožňují kladení většího množství materiálu. Výrobci označují počet vláken rovnou v tisících a nejčastěji se jedná o 12K, 24K a 48K. Uhlíková vlákna se dělí na nízkomodulová (LM), středněmodulová (IM), vysokomodulová (HM, UHM), s vysokou pevností (HT) a vysoce pevná, s nižší tuhostí a vyšší tažností (HST).

Mezi přednosti uhlíkových vláken patří vysoká pevnost i modul pružnosti v tahu až do teploty 500°C. Mají nízkou hustotu a skvělé antikorozi vlastnosti. Mohou se aplikovat v medicíně pro dobrou snášenlivost s tkáněmi. Dobře vedou elektrický proud i teplo. Anizotropní vlastnosti ovlivňují i tepelnou roztažnost, která je v různých směrech rozdílná. Dynamické vlastnosti uhlíkových kompozitů jsou lepší než u všech ostatních konstrukčních materiálů. Dobře propouští záření a neodráží tak radarové paprsky. Přes jejich hořlavost probíhá samotné hoření velmi pomalu. Musejí se upravovat apretací, z důvodu jejich křehkosti a snadného lámání. Zároveň apretace zlepšuje spojení s matricí. Apretace bývá na bázi epoxidové pryskyřice a při delším skladování dochází k jejímu samovolnému vytvrzení.

1.2.4 Přírodní vlákna

Pro výztuhu plastů jsou vhodná pouze rostlinná celulózová vlákna např. konopí, len, sisal, juta, ramie a bavlna. Odolávají stárnutí a jsou čichově nezávadná při měnících se klimatických podmínkách. Vynikají nízkou hustotou, relativně velkou pevností, malou abrazivitou při mechanickém zpracování a výhodnou likvidací spalováním. Omezením je závislost vlastností na růstu, délka vláken, citlivost na vlhkost, nákladná úprava pro lepší vazbu s matricí a omezená možnost volby matrice z důvodů nižší teplotní odolnosti.

1.2.5 Porovnání vláken

Srovnání vlastností kompozitů s nejpoužívanějšími vlákny znázorňuje tabulka 2. Detailnější rozdíly ve vlastnostech vláken a jejich základní fyzikální hodnoty pak uvádí příloha č. 1. Největší rozdíly panují v anizotropii mechanických vlastností a součinitelích teplotní roztažnosti. Ty v některých případech nabývají i záporných hodnot. Rozdíly ve vlastnostech nejsou pouze mezi různými materiály vláken, ale silně závisí i na vlastnostech matrice a závisí na ni i chemická odolnost. Pouze uhlíková vlákna jsou inertní vůči rozrušování v kyselém nebo alkalickém prostředí a také oproti ostatním vedou elektrický proud.

Cenu vláken udává zejména výchozí materiál a náročnost zpracování. Skleněná vlákna mají dostupnou a levnou výchozí surovinu a relativně nenáročný způsob zpracování. Aramidová vlákna mají taktéž levné vstupní materiály, ale proces výroby probíhá pomalu a s nutností použití agresivních rozpouštědel se prodražuje. Uhlíková vlákna vyžadují kvalitní, předupravené suroviny a navíc je proces výroby energeticky vysoce náročný. Orientačně lze říci, že cena skleněných vláken se pohybuje v rozmezí 2 až 3 €, aramidových 20 až 30 € a uhlíkových 20 až 80 € za kilogram. U speciálních typů uhlíkových vláken ale cena může vzrůst až k 1000 € za kilogram. [1]

Tabulka 2 Všeobecné srovnání některých vlastností kompozitů [1]

Vlastnosti	Kompozity		
	Skleněné	Aramidové	Uhlíkové
Hustota	+-	++	+
Mez pevnosti v tahu	+	+	+
Mez pevnosti v tlaku	+	-	+
Modul pružnosti v tahu	-	+	++
Rázová houževnatost	+	+	-
Tlumení	-	+	-
Chování při statickém a dynamickém namáhání	+	+	++
Dielektrické vlastnosti	++	++	-
Adheze, přilnavost	++	-	+
Nasákavost	+	-	+
Cena	++	+-	-

1.3 Matrice

Matrice je materiál, který spojuje vlákna a po jejímž zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Mezi úkoly matric patří přenos namáhání na vlákna, přenos zatížení z vlákna na vlákno, zajištění geometrické polohy vláken a jejich ochrana před okolními vlivy. Hlavní význam na výsledné vlastnosti kompozitu má adheze na rozhraní matrice-vlákno. Ke zlepšení adhezních schopností se často vlákna opatřují apretací. Důležité

také je, aby matrice obklopila vlákno úplně a bez bublin. Matrice se dělí na termosetové a termoplastické.

1.3.1 Termosetové matrice

Mají výhodu pro jejich nízkou viskozitu, řádově nižší než u termoplastických. Výborně tudíž smáčí vlákna a snadno prostupují mezi jednotlivými vrstvami. Navíc tento jejich stav platí za normálních nebo mírně zvýšených teplot. K následnému vytvrzení dochází přidáním katalyzátoru a urychlovače. Vytvrzení může být způsobeno i dodáním energie. Výsledný kompozit má vysokou pevnost a tuhost, ale nízkou tažnost. Křehkost takto získaných výrobků lze snížit přidáním modifikačních přísad. Nevýhodou je omezená skladovatelnost polotovarů s touto matricí, kdy dochází k neustálému pomalému vytvrzování. Pro jednodušší zpracování tvoří termosetové matrice většinu polymerních kompozitů. Používají se nenasycené polyesterové, vinylesterové, epoxidové a fenolické pryskyřice.

1.3.2 Termoplastické matrice

Termoplastické matrice oplývají oproti termosetovým houževnatostí. V procesu jejich zpracování nedochází k chemické reakci, ale pouze k tepelnému působení. Nedochází tak k negativnímu vlivu na životní prostředí a jejich recyklace je mnohem snazší. Navíc mají lepší teplotní a chemickou odolnost. Vyznačují se krátkou dobou zpracování, lze je dotvarovat a spojovat svařováním. Nevýhodou je nutnost jejich zpracování za vysokých teplot a vlivem jejich viskozity horší prosycování vlákenných materiálů. Často se tak používají zejména pro kompozity s krátkými vlákny, které se zpracovávají běžnou technologií vstřikováním. V této oblasti tvoří většinu. Vlivem vyšších nákladů na zpracování vláken do plastu se vyztužují dražší materiály jako polyamid, PBT, PC, polyacetál, PPO a polypropylen. [1]

1.4 Zpracování kompozitů

Vyztužující vlákna se zpracovávají do formy kompozitů mnoha technologiemi. Ty se dělí podle výroby na tvorbu polotovarů či na přímou produkci součástí. Dále odlišujeme technologie podle druhu použité matrice.

1.4.1 Výroba polotovarů s termosetovou matricí

Polotovary s termosetovou matricí se vyrábějí ve formě prepregů neboli předimpregnovaných vláken. Jejich hlavní výhodou je prosycení výtzuže pojivem již před dalším zpracováním. Tento způsob je na rozdíl od pozdějšího impregnování

kontrolovatelný a reprodukovatelný. Skladování probíhá za teplot pod bodem mrazu a z důvodu samovolného vytvrzování se musí spotřebovat do šesti měsíců.

Prepregy z dlouhých jednosměrně orientovaných vláken se nazývají jednosměrné prepregy. Ošetřené pramence se ukládají mezi krycí papír a následně navíjejí. Povrch při aplikaci je mírně lepivý, což lze zlepšit zahřáním. Přichycení takto vytvořených pásků k povrchu se provádí přitlakem. Vytvrzení probíhá v autoklávu nebo lisováním.

SMC prepregy vznikají sekáním pramenců na krátká vlákna, která jsou nanášena na folii s vrstvou plniva a pryskyřice. Obdobná folie se přivádí i z druhé strany a vše se následně navíjí. Rozlišujeme několik druhů těchto prepregů podle orientace vláken, čímž získáváme izotropní nebo anizotropní vlastnosti polotovaru. Výsledné zpracování se provádí zejména lisováním.

1.4.2 Výroba polotovarů s termoplastickou matricí

Produkce polotovarů s termoplastickou matricí je problémová. Nejčastěji se vyrábějí polotovary formou hybridní příze, vytlačováním nebo jako GMT.

Vytlačované polotovary vznikají nalisováním vyztužujících vláken do natavené termoplastické folie. Takto vzniklé polotovary jsou ale obtížně skladovatelné a samotné prosycení není dokonalé.

Hybridní příze vznikají tkaním různých materiálů. Buď se tká směsný materiál složený z nosných a termoplastových vláken, nebo je tkanina tvořena odlišnými materiály v útku a osnově. Následuje navinutí a konečné zpracování většinou lisováním.

GMT polotovary jsou plasty vyztužené skleněnou rohoží. Nekonečná vlákna se pokládají na rohož ze sekaných vláken a následně se obě vrstvy prošíjí. Dva takto vzniklé polotovary se přivádějí k ocelovým pásům, vstříkne se mezi ně tavenina a následným lisováním se vrstvy spojí. Následuje řezání na deskovité polotovary.

1.4.3 Výroba kompozitů s termosetovou matricí

Kompozity s termosetovou matricí se vyrábějí mnoha způsoby. Rozdělit je můžeme například podle stupně automatizace jejich zpracování.

Ruční metody

Malé série, rozměrné díly a prototypy se zpracovávají ručně. Tyto metody jsou náročné na kvalitu ruční práce, ale nevyžadují drahé nástroje a prostředky. Přesnost a výsledná jakost silně závisí na zpracovateli a je obtížně opakovatelná. Tkaniny nebo rohože se vkládají do formy a pryskyřice se nanáší štětcem či nástřikem pistolí. Při tomto způsobu výroby nelze dosáhnout úplného odvzdušnění laminátu.

Poloautomatizované metody

Malé série a velkoplošné díly se zpracovávají tzv. stříkáním laminátů, které patří mezi poloautomatizované způsoby. Matrice, vlákna a ostatní složky se nanášejí stříkacím zařízením na povrch formy. Používají se vlákna ve formě pramenců, které se před nánosem sekají na délku 20 až 50 mm. Pro tuto technologii se používají jednoduché lehké formy, stejné jako u ručního zpracování. Stříkací hlava může být automatizována, čímž lze dosáhnout reprodukovatelného rozdělení výztuže.

Mezi další poloautomatizované metody patří nízkotlakové lisování. To může probíhat využitím nízkotlakových technologií např. metodou lisování pomocí vakuovaného vaku, lisování pomocí tlakového vaku, lisováním v autoklávu a dalšími způsoby. Tyto technologie se vyznačují použitím přetlaku nebo podtlaku. Kladení vláken do formy probíhá většinou mimo samotnou formu. V případě lisování v autoklávu dochází vlivem současného působení tepla i tlaku rovnou k vytvrzení výlisku.

Nízkého tlaku využívají také injektážní technologie. Jedná se zejména o metody RTM, RIM a jejich modifikace. Obě používají dvoudílné formy z laminátu, plastbetonu či oceli. Výztuž se vloží do formy a následně se vstříkne pryskyřice. Technologie RTM nejdříve mísí jednotlivé složky pryskyřice a následně přivádí směs do formy. Metoda RIM vstříkuje přímo jednotlivé složky a ty se mísí až ve formě. Forma bývá často vyhřívána pro urychlení procesu vytvrzení. Tyto technologie se hodí především pro středně velké série.

Plně automatizované metody

Plně automatizované technologie se vyznačují tím, že nevyžadují další nutné způsoby opracování výrobku. Dělí se na lisování za tepla, za studena a tzv. mokré lisování.

Mokré lisování může probíhat za přívodu tepla i bez něj, používá lisovacích nástrojů z plastbetonu a hodí se pro malosériovou výrobu. Cena lisovacích nástrojů je nízká a často se aplikují předtvarované polotovary ze sekaných vláken tzv. tvarovky. U tohoto způsobu se používají pojiva s velmi krátkým vytvrzovacím časem. Výztuž se vloží do formy, zalije pryskyřicí a nástroj se uzavře.

Lisování předimpregnovaných lisovacích hmot za tepla probíhá na hydraulických lisech s ocelovými formami. Dvoudílné formy jsou vyhřívány elektricky, olejem nebo párou. Zpracovávat tímto způsobem se mohou kapalné pryskyřice i předimpregnované výztuže. Tato technologie se hodí hlavně pro zařazení do automatizovaných linek v třísměnném provozu.

Kontinuální výroba

Kontinuální laminace spočívá v nanášení výztuže na nosnou folii s pryskyřicí, prosycením a zakrytím další folií. Pás poté prochází tvarovacím a vytvrzovacím zařízením a následně se navíjí. Další podobnou technologií může být tažení, při kterém se vlákna ve formě pramenců táhnou prosycovací vanou, následně se tvarují a vytvrzují. Tyto metody se používají především pro výrobky jednoduchých tvarů.

Speciální technologie

Do této kategorie spadají například metody ovíjení, splétání a odstředivého lití. Při ovíjení a splétání se pramence přivádějí na nosné jádro, které se po dokončení vyjme, ponechá nebo odstraní jiným způsobem. Technologií ovíjení lze přímo nanášet pramence prosycené pryskyřicí. Touto metodou se vyrábějí např. nádrže, roury, listová pera aj.

Splétání vyžaduje vysoké investiční náklady a vytváří tkanou strukturu na povrchu jádra. Jedná se o technologii převzatou z textilního průmyslu. Tímto způsobem lze vyrábět například kolena rour s proměnným průřezem či tenisové rakety. Prosycení vláken se provádí až po samotném opletení.

Další speciální technologií převzatou ze slévárenského průmyslu je odstředivé lití. Slouží pro tvorbu rotačně symetrických těles s hladkým povrchem, zvláště vhodná je na výrobu trub pro dopravu agresivních médií. Vlákna jsou totiž koncentrována u vnější vrstvy. Hodí se pro střední a velkosériovou výrobu.

1.4.4 Výroba kompozitů s termoplastickou matricí

Kompozity s termoplastickou matricí se často lisují z GMT polotovarů. Skleněná výztuž zabraňuje roztékání lisovací hmoty. Polotovar je předehřán, vložen do formy, zalisován a ochlazen. Nižší podíl trhu tvoří tzv. lisování ve formě, kdy vložený přístřih zalisujeme, a vznikne výrobek s přetoky. Tato metoda je vhodná zejména pro jednoduché výlisky s rovnoměrnou tloušťkou stěn. Častější (95 %) je využíváno lisování s přetlačováním, kdy se přesně odvážený přířez zalisuje bez přebytku materiálu. Polotovar je vyšší a dochází ke značnému pohybu materiálu. Takto vyrábíme zejména složitější výlisky s žebry.

Druhým způsobem výroby tohoto druhu kompozitů je technologie vstřikováním. Granulát se vytváří tažením nebo vytlačováním pramence spolu s termoplastem a následně se seká na požadovanou velikost. Zpracování pak probíhá stejně jako u nevyztužených plastů. Aby se materiál nemusel dvakrát ohřívat, existují technologie, kdy se pramenec s termoplastem neseká, ale rovnou klade do formy, kde je následně dolisován. Této metodě se říká D-LFT, neboli přímé vstřikování s lisováním. Umožňuje vytvářet termoplastické kompozity s dlouhými vlákny.

1.5 Použití

Polymerní kompozity vyztužené vlákny patří mezi materiály s anizotropními vlastnostmi. Výjimku tvoří plasty s krátkými vlákny, které ale zastávají menšinu. Anizotropní vlastnosti nám umožňují využití pevnosti nosného materiálu právě ve směru namáhání. Zároveň kladou větší nároky na konstrukci a výrobu. Vyztužující materiály se zpravidla ukládají ve vrstvách a takto tvořené kompozity se nazývají lamináty. Vrstvy se většinou orientují v různých směrech, aby se zamezilo namáhání matrice a většinu zatížení tak přenáší vyztužující materiál. Mezi hlavní výhody kompozitů patří velká pružnost při deformaci, vysoká pevnost a tuhost, odolnost vůči dynamickému namáhání, vysoká odolnost vůči korozi a stárnutí, nízký součinitel teplotní roztažnosti a velké množství kombinací nosných materiálů s matricí. Nevýhody lze pozorovat zejména ve vysokých nárocích na konstrukci a zpracování dílů, obtížném zkoušení, nízké tahové pevnosti v kolmém směru na vlákna, nízké odolnosti vůči působení vlhka a tepla, obtížné opravitelnost a problémové recyklaci.

1.5.1 Použití uhlíkových kompozitů

Rozvoj kompozitů s uhlíkovými vlákny začíná koncem 50. a začátkem 60. let. Jejich použití směřovalo hlavně do oboru letectví a kosmonautiky, kde jejich přínos měl značný vliv. Tato odvětví stále tvoří velký podíl trhu, ale uhlíkové kompozity již dávno pronikly do dalších aplikací. Jedná se o použití ve sportu, vojenství, energetice i stavebnictví. Uhlíková vlákna tak nalezneme např. v závodních vozech F1, lodích, letadlech, větrných elektrárnách či tenisových raketách. Kompozity na bázi uhlíkových vláken nahrazují tradiční materiály při významném snížení hmotnosti. Právě proto jejich použití odstartovalo v letectví a kosmonautice, kde snížení hmotnosti má největší přínos. Odhaduje se, že snížení hmotnosti o jeden kilogram v kosmonautice ušetří 25 000 €. V letectví se tato hodnota pohybuje okolo 1 000 € a v automobilovém průmyslu 3 € na kilogram. [1] Navíc se uhlíkové kompozity vyznačují vysokou pevností, vynikajícími dynamickými vlastnostmi, dostatečnou odolností vůči hoření, vysokou odolností proti korozi a příznivým chováním při nárazu. Nárůst aplikace těchto materiálů lze demonstrovat na použití v leteckém průmyslu. Firma Airbus v roce 1972 u modelu A300 použila 5 % kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny a v roce 2005 u modelu A380 narostl tento podíl na 22 % hmotnosti. Letoun Boeing 787 z roku 2009 je tvořen různými kompozitními materiály dokonce z 80 % objemu a z 50 % hmotnosti. [2] Jejich značnou část představují právě kompozity s uhlíkovými vlákny. Uhlíkové kompozity pronikají i do stavebnictví, kde se s nimi experimentuje např. při stavbě mostů, které mají o 20 % nižší cenu a dvojnásobnou životnost [3], viz obrázek 1.



Obrázek 1: Nafukovací kompozitní oblouky z uhlíkových vláken vyvinuté University of Maine pro stavbu mostních konstrukcí [4]

V současné době vzrůstá snaha o aplikaci uhlíkových kompozitů zejména v automobilovém průmyslu. Odhaduje se, že plasty u dnešních vozů šetří 200-300 kilogramů hmotnosti, což představuje úsporu 0,5 litru paliva na sto kilometrů. [5] Rozsáhlé použití uhlíkových kompozitů nalezneme například u vozů F1 i ostatním motorsportu. Dále se aplikují při výrobě tzv. supersportů jako je Lamborghini Aventador, Bugatti Veyron či Lexus LFA, tedy u vozů kde není cena limitujícím kritériem. Tyto automobily se vyrábějí s celouhlíkovou karoserií a s deformačními zónami z hliníkových slitin. Experimentuje se i s přímou deformací uhlíkových vláken, ale v současné době nejsou simulační programy kompozitních materiálů na stejné úrovni jako u kovů. [6] Hlavně z ekonomických důvodů se tak v běžné praxi uhlíkové kompozity rozšiřují zejména u nosných prvků, v místech s vlivem na významné snížení hmotnosti či podstatným zlepšením vlastností výrobků.

Se současným rozvojem elektromobilů mají uhlíkové kompozity tendenci nahrazovat kovové díly ve stále větším měřítku a přestává platit jejich současné použití limitované cenou. Příkladem může být připravované BMW i3 s celokarbonovou karoserií viz obrázek 2. I přes vysokou cenu uhlíkových vláken se totiž značné snížení hmotnosti významně projeví na zvýšení dojezdu těchto vozů a použití lehčích materiálů tak kompenzuje vysokou hmotnost používaných baterií. Jedná se tak o první aplikaci uhlíkových vláken v automobilovém průmyslu v sériové výrobě. Firmě BMW se tak podařilo odstranit vysoký podíl ruční práce při zpracování uhlíkových kompozitů a naznačuje tak budoucnost směřování vývoje. [7]

Oblast použití uhlíkových kompozitů je ale velice široká a neustále se rozšiřuje. Hlavní překážku omezující jejich větší rozmach představuje především cena. S větší poptávkou se ale cena snižuje a zároveň se rozšiřuje oblast rentabilních aplikací. Další

potíž je v relativně malých zkušenostech s těmito materiály v oblasti konstrukce, zpracování a recyklace, nicméně výzkum v této oblasti je rapidní.



Obrázek 2: Karoserie BMW i3 z uhlíkových kompozitů [8]

1.6 Recyklace

Opakované použití kompozitů pro výrobu stejných dílů je nyní prakticky nemožné. S rostoucím počtem aplikací ale roste snaha o nalezení nových technologií recyklace. Zejména s pronikáním do hromadné výroby jsou uzavírána nová partnerství na bázi společného výzkumu a sdílení zkušeností, příkladem může být spolupráce firem BMW Group a Boeing. [9] V současné době se používají zejména metody drcení, tavení, chemického zpracování a spalování.

Při recyklaci drcením lze část materiálu přidávat do nových výrobků bez zhoršení vlastností, ale s negativním vlivem na vzhled a kvalitu povrchu. Další metodou recyklace je roztavování, použitelné pro termoplastické matrice, a chemické zpracování, kam patří hydrolýza, hydrogenerace a pyrolýza. Ani u jedné z metod se nevyvarujeme zhoršení vlastností vláken a často i jejich zkrácení. Proto je nutné hledat aplikace, u kterých by recyklát vyhovoval. Krátká vlákna se hodí například do betonových směsí, kde se snadněji rozptýlí a značně zvyšují ohybovou pevnost betonu. Zároveň díky své elektrické vodivosti mohou sloužit k monitorování stavu betonových konstrukcí, takže se takto upravený materiál může chovat jako snímač. [10] Jakákoliv forma recyklace ale musí splňovat ekonomická hlediska, kdy recyklát musí být výrazně levnější než nový materiál.

Spalováním můžeme využít energii vázanou v materiálu a představuje tak další formu zpracování, ale nejedná se již o recyklaci. Hořením se sice uvolňují zdraví škodlivé látky, ale díky moderním technologiím a filtrům jsme schopni jejich drtivou většinu zachytit. Výhřevnost kompozitů je různá, ale pohybuje se zhruba na úrovni domovního odpadu. Spalování kompozitů a plastů obecně nemůžeme považovat za plýtvání, pokud uvážíme, že 90 % ropy se používá na výrobu benzinu, nafty a topných olejů. [1]

2 Metody ovíjení a splétání

Existuje několik základních metod pro tvorbu ovinu či opletu. Pocházejí z různých oblastí průmyslu a značně se modifikují pro konkrétní aplikace. V následujícím textu budou zmíněny některé vybrané technologie.

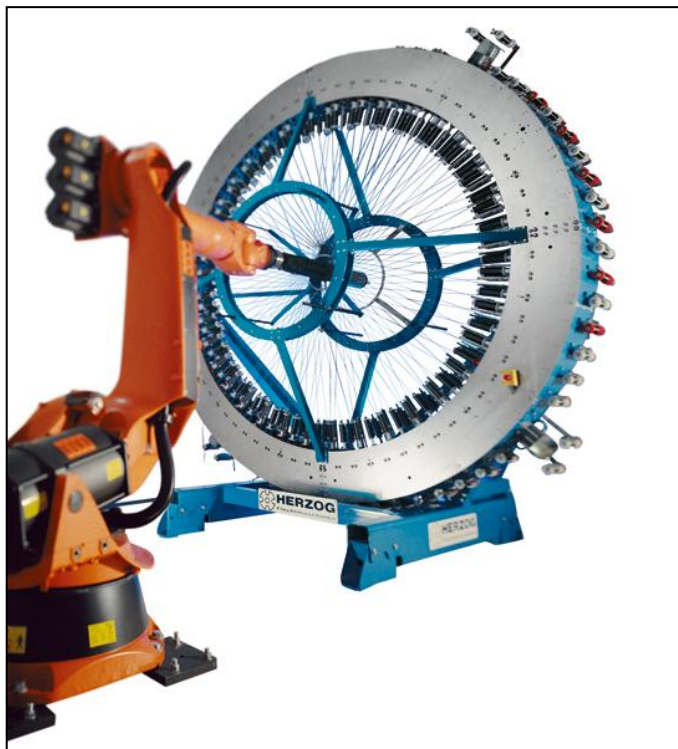
2.1 Splétání

Technologie splétání má své kořeny již ve starověku. Hojně se využívá v textilním průmyslu pro výrobu lan a bužírkových opletů. Déle se tato technologie využívá při výrobě kabelů, výztuh hadic i jiných aplikacích. Pronikání splétání do výroby textilních materiálů započalo v sedmdesátých letech snahou vědců z McDonnell Douglas s cílem redukce nákladů při výrobě konstrukčních prvků. [11] Následovalo mnoho dalších výzkumů pro aplikaci této technologie do praxe. Splétání můžeme rozdělit na výrobu 2D a 3D opletů. Obě metody využívají různých strojů a výsledné oplety mají odlišné vlastnosti. Oplety se zařazují mezi textilní struktury stejně jako tkané a pletené výrobky.

2.1.1 2D splétání

Dvourozměrný oplet představuje válcový pružný materiál složený z propletených vláken. Splétací stroj se skládá ze dvou nebo více sad přízí, pohybujících se v protínajících kruhových drahách s řadou vyhybek. Vyhýbáním cívek dochází ke vzniku pletené struktury. Obrisy vyráběné 2D splétáním jsou často omezené na kruhový tvar nebo tvar jádra. V současné době mají největší stroje okolo 144 cívek umístěných na průměru 2,3 metru. Pohyb cívek probíhá po kruhové dráze, kdy osa cívky směřuje do osy stroje. Osa kruhové dráhy je většinou umístěna horizontálně. Jedno z nejčastějších uspořádání splétacího stroje znázorňuje obrázek 3. Regulací rychlosti pohybu cívek a rychlosti odtahu můžeme získávat různé tvary výrobku. Zejména při výrobě lan se často používají stroje s vertikální osou a cívky nesměřují do středu stroje, ale jejich osy jsou rovnoběžné s osou rotace zařízení.

Stroje můžeme rozdělit na dvouosé a tříosé. Tříosé se odlišují přidáváním podélných vláken pro větší axiální pevnost. Vláknata jsou přiváděna přes naváděcí ústrojí, které pomáhá formovat budoucí tvar. Tloušťka opletu je dána počtem vrstev. Pro lepší pevnost mohou být tyto vrstvy spojeny. Samotné vlastnosti opletu pak definuje zejména úhel kladení, který se přizpůsobuje podle zatěžování výrobku. Mezi výrobce těchto strojů patří například August Herzog Maschinenfabrik GmbH & Co. KG (dále Herzog GmbH), Sintech Machinery Pvt. Ltd. a Niehoff GmbH.



Obrázek 3: Splétací stroj Herzog RF 1/144-100 [12]

2.1.2 3D splétání

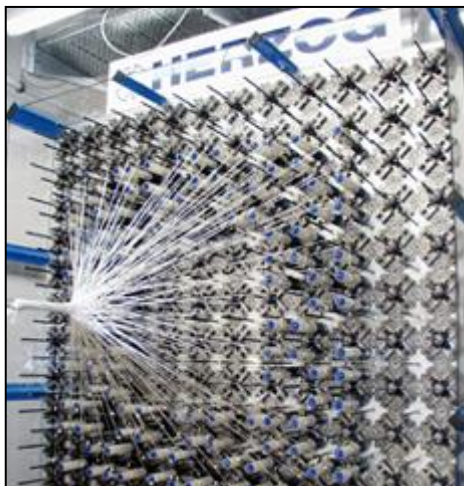
O 3D splétání mluvíme v případě, kdy vlákna procházejí mezi několika vrstvami. Používá se hlavně pro tvorbu vícesměrných struktur (zvláště u kompozitů) a pro své speciální vlastnosti ve směru kolmém na vrstvu. Vzhledem ke špatným vlastnostem 2D kompozitů v kolmém směru na vrstvu, získávají 3D oplety významnou pozici v současném vývoji.

Stroje pro výrobu 3D opletů se liší v počtu cívek i jejich uspořádání ve stroji. Držáky cívek jsou zpravidla rozmístěny v rovině do kruhového či obdélníkového tvaru. Každý držák představuje buňku, která se může posunout na pozici jiné buňky v libovolném směru. Vzájemným pohybem se tvoří pletená struktura, která se může i nemusí opakovat. 3D splétání dokáže vytvářet téměř libovolný tvar zapletený do hloubky. Stroje pro výrobu lze rozdělit na dvoustupňové, čtyřstupňové a interlokové. [11]

Dvoustupňové stroje se skládají z dvou sad cívek. Jedna je nehybná, tvořící axiální vlákna, a druhá se pohybuje mezi nimi. Poměr pohybujících se cívek vzhledem ke statickým je vždy menší než jedna. Čtyřstupňové stroje mohou i nemusí obsahovat statické cívky pro axiální vlákna. Cívky se smí pohybovat ve čtyřech směrech a tím vznikají struktury propletené do hloubky. Docílíme tím spojení vnějších i vnitřních vrstev. Automatizace a sladění těchto pohybů představuje poměrně složitý úkol. Obě tyto metody mohou produkovat složité tvary, ale zkušenosti ukazují, že dvoustupňové

stroje dosahují lepší tvarové stability a zároveň se vyznačují vyšší pevností v tahu i modulem pružnosti v axiálním i radiálním směru. Interlokové stroje představují modifikaci dvoustupňových a vytváří blokovou vícevrstvou pleteninu, jejíž vlastnosti jsou lepší než u obou předchozích metod. [11]

V současné době jsou stroje pro 3D splétání intenzivně rozvíjeny, ale spíše se stále jedná o výzkum než použití v praxi. Vznikají spojení zejména mezi univerzitami, výrobci klasických splétacích strojů a výzkumnými ústavy. Jeden z prototypů vznikajících v kooperaci firmy Herzog GmbH a ITA znázorňuje obrázek 4.



Obrázek 4: 3D splétací stroj ze spolupráce týmů Herzog GmbH a ITA [13]

2.2 Ovíjení

Technologie ovíjení má své základy v textilním průmyslu. Jedná se o jistou modifikaci běžně používaných metod soukání a přesoukávání. Ovíjení se vyznačuje nanášením materiálu na nosné jádro bez tvorby vazeb. Rozdělení můžeme provést na základě pohybu jádra, a to na stroje s rotujícím či statickým jádrem.

2.2.1 Ovíjení se statickým jádrem

U ovíjení se statickým jádrem koná ovíjecí materiál rotační pohyb kolem jádra. Rychlost pohybu materiálu je několikanásobně vyšší než pohyb jádra, na kterém se tvoří návin. Jedná se o poměrně rychlé způsoby tvorby ovinu. Jádro se většinou pohybuje přímočaře nebo rotuje kolem osy symetrie. Tyto metody se používají většinou pro ovíjení uzavřených těles a dlouhých objektů. Typickým znakem těchto technologií bývá rotující prstenec, obíhající okolo ovíjeného tělesa. Vzniká paralelní vinutí, jehož stoupání závisí na zvolených otáčkách prstence a rychlosti pohybu jádra.

Ovíjení s připravenou zásobou materiálu

Ovíjení s připravenou zásobou materiálu se používá zejména při výrobě toroidních cívek. Jádro cívky se vloží do uzavíratelného prstence. Po uzavření se

na prstenec z externí cívky přesouká potřebná zásoba materiálu, typicky měděného drátu, jehož volný konec se zachytí k ovíjenému jádru. Opětovnou rotací prstence se současnou pomalou rotací jádra se tvoří návin. V případě potřeby může pracovat více rotujících prstenců současně. Výhoda této technologie je v tom, že rotuje právě takové množství materiálu, jaké je potřeba. Rotující hmota tak má minimální setrvačné účinky. Nevýhody spočívají v mezikroku tvorby návinu, kdy dochází k prodloužení doby celé operace, a obtížné aplikovatelnosti pro jiné účely. Mezi výrobce těchto zařízení patří například RUFF GmbH, Mega Bobinadeir a Jovil Universal Zhongshan Ltd.



Obrázek 5: Zařízení firmy Ruff GmbH pro ovíjení cívek [14]

Ovíjení s externím přívodem materiálu

Tato technologie je modifikací ovíjení s připravenou zásobou materiálu. Používá se pro výrobu malých toroidních cívek a pro balení svazků drátů. Nemá vytvářena úplná zásoba materiálu, ale pouze částečná. Využívá se velkého obvodu rotujícího prstence a zároveň menšího průměru ovíjeného jádra. Zásobu materiálu představuje pouze délka obvodu rotujícího prstence. Před překryvem materiálu dojde k odstřihnutí přívodu a spotřebovává se zásoba na prstenci. U ovíjení malých toroidních cívek vystačí zásoba na prstenci pro celou operaci. V případě ovíjení svazků drátů se po odstřihnutí ve vhodný okamžik přivede další materiál. V případě navazování je nutná přesná synchronizace a naváděcí ústrojí, proto se používá hlavně pro obalové materiály s možnou lepidlovou vrstvou. Obrázek 6 znázorňuje stroj tohoto typu od firmy Shanghai Jinglin Packaging Machinery Co., Ltd.



Obrázek 6: Ovíjecí zařízení s externím přívodem materiálu firmy Shanghai Jinglin Packaging Machinery Co., Ltd. [15]

Ovíjení s rotujícími cívkami

Při tomto způsobu ovíjení je cívka připevněna přímo k rotujícímu prstenci. V případě potřeby může být použito i více cívek. Připojením cívek k prstenci narůstají setrvačné účinky a zařízení musí být dimenzováno na větší zatížení. Odpadají ale problémy spojené s mezioperacemi přesoukávání. Využití této technologie můžeme nalézt opět v obalové technice. Výrobou těchto zařízení se zabývají například firmy Fhope Packaging Machinery Co., Ltd. a Shanghai Jinglin Packaging Machinery Co., Ltd.



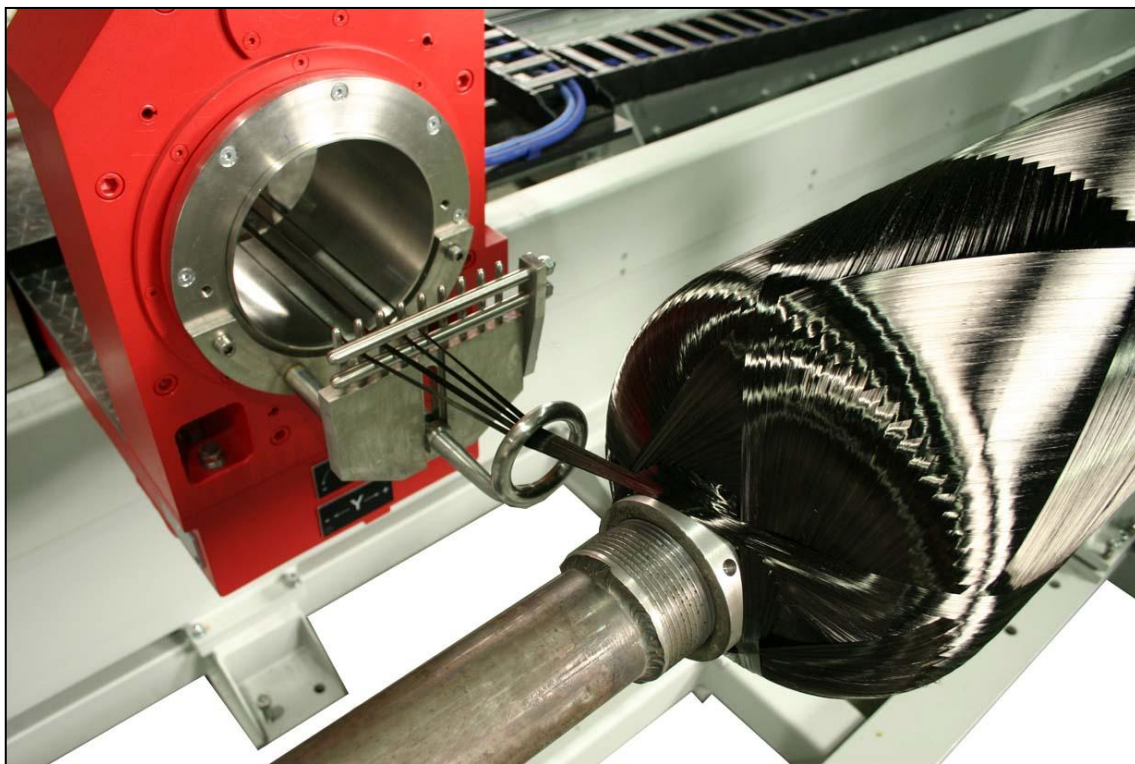
Obrázek 7: Ovíjecí zařízení s rotující cívkou firmy Shanghai Jinglin Packaging Machinery Co., Ltd. [15]

2.2.2 Ovíjení s rotujícím jádrem

Při ovíjení s rotujícím jádrem koná hlavní pohyb ovíjené jádro. Materiál je dodáván nanášecím ústrojím, které se pohybuje přímočaře v jednom nebo více směrech. Tento druh ovíjení se hojně používá při výrobě kompozitů, zejména pro výrobu potrubí a tlakových nádob velkých rozměrů, jejichž rozměry mohou dosáhnout až 60 metrů. Ovíjené jádro je opatřeno lepidlovou vrstvou nebo se přímo nanášejí vlákna ve formě prepregů, které se po ovinutí pouze vytvrdí. Další možností je vytvoření ovinu a následné zastříknutí pryskyřicí. Technologii s rotujícím jádrem můžeme rozdělit na ovíjení vláknů a na pokládání vláken.

Ovíjení vláknů

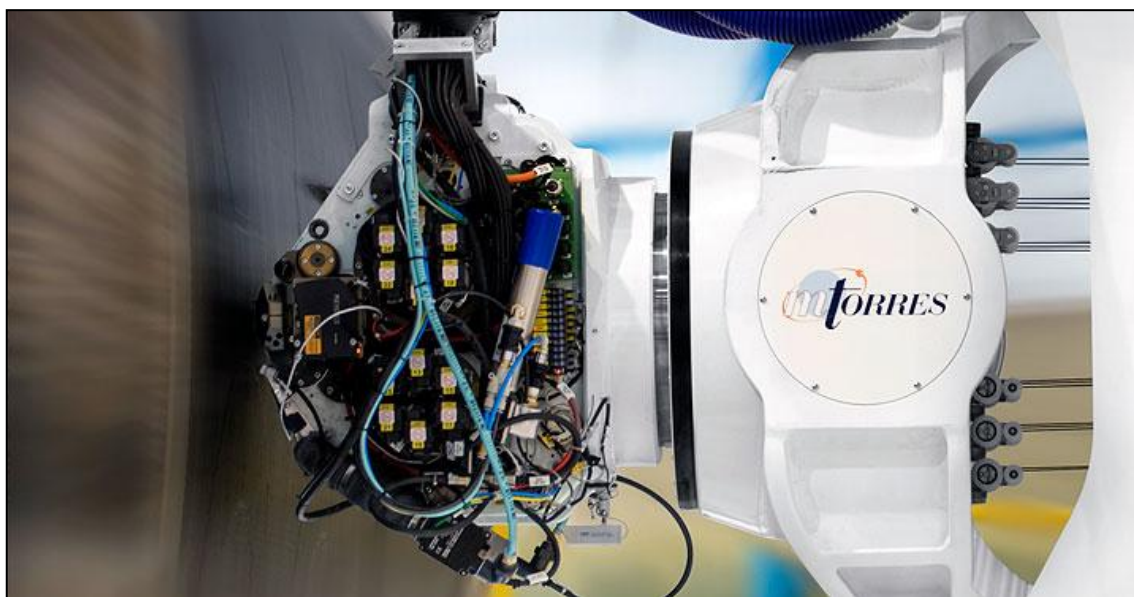
Tento způsob ovíjení vznikl před více než 50 lety a vyznačuje se stálým tahem ve vláknech. Materiál je nepřerušovaně odvíjen a pokládán na jádro. Takto se mohou nanášet prepregy i neošetřené pramence. Vlákna drží na jádru pomocí tření, případně může být nosné jádro ošetřeno adhezní vrstvou. Během procesu se nesmí vlákna stříhat, jelikož by došlo ke ztrátě tahu a deformaci ovinu. Tato metoda je náročná zejména na kalkulaci dráhy vláken, kdy je potřebné ovinout celý objekt rovnoměrně a zároveň nesmí dojít ke sklouzávání z jádra. Mezi výrobce těchto strojů patří například firmy Entec Composite Machines, Inc a Mikrosam AD, jejíž stroj znázorňuje obrázek 8. [16]



Obrázek 8: Ovíjení vláknů s rotujícím jádrem [17]

Pokládání vláken

Pokládání vláken se odlišuje od ovíjení nepřítomností tahového napětí ve vláknech. Vývoj této technologie rapidně narostl v 70. a 80. letech zejména díky potřebám leteckého průmyslu a vesmírného vývoje. Jádro rotuje, přítlačná hlavice je s ním v neustálém kontaktu a nanáší materiál. Zpracovávat touto technologií lze pouze prepregy nebo materiály s termoplastickou matricí. Materiál může být v každém okamžiku odstřižen pomocí nůžek nebo laseru. Přílnavost vláken je dána jejich lepivostí či tepelným působením. Tato technologie umožňuje ovíjet složité tvary a dovoluje pokládat vlákna v libovolném směru na libovolném místě. Použití není limitováno pouze na prostorové výrobky, ale technologii lze úspěšně aplikovat i na rovinné útvary. Výrobci těchto zařízení jsou například firmy Mikrosam AD a M.Torres Diseños Industriales S.A.U.



Obrázek 9: Nanášecí hlavice při pokládání vláken [18]

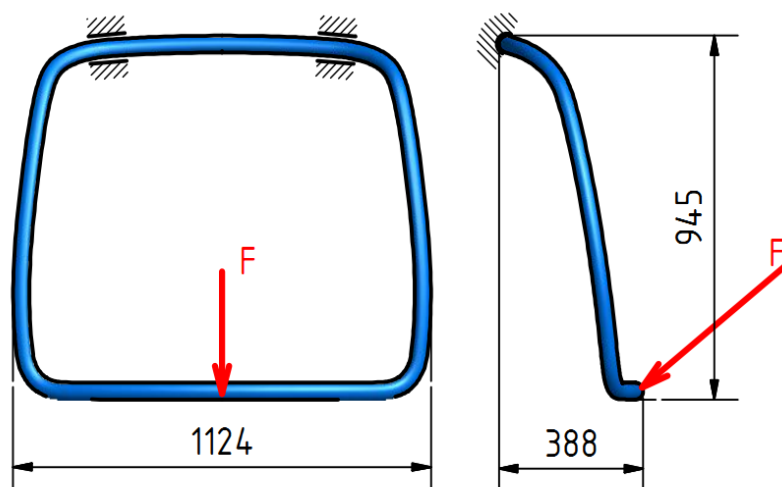
3 Požadavky na zařízení

Navrhované zařízení musí být schopno tvorby ovinu dle požadavků zadavatele. Snahou je použití standardních cívek bez přesoukávání a v případě nutnosti této meziprocedury určit maximální možnou velikost přesoukaných cívek. Výkonnost stroje vychází z předběžné časové kalkulace, kdy je požadováno vytvoření ovinu během pěti minut. Odmyslíme-li čas potřebný na založení rámu a navedení pramenců, zbývají na samotné ovíjení přibližně čtyři minuty. V případě nesplnění těchto časových požadavků zadavatele, bude nutné použít více zařízení pro dosažení stejné kapacity. Jelikož se jedná o prototyp, byla ve fázi konstruování snaha o minimalizaci vyráběných dílů a maximální využití již standardně vyráběných produktů.

3.1 Rám a jeho zatěžování

Nově tvořený rám bude sloužit jako výztuha a nosný prvek pro další součásti. Konkrétní způsob jeho zatěžování zatím není stanoven, protože požadavky na namáhání vycházejí od externích zadavatelů a často se mění. Předpokládá se ale dominantní zatěžování ohybem. Pevnostní analýza rámu není tématem této práce, a proto nebude podrobněji rozebírána. V současné době se rámy vyrábějí z oceli a od použití uhlíkových vláken se očekává zejména redukce hmotnosti a korozivzdornost.

Konstrukce zařízení vychází z jednoho konkrétního rámu dodaného zadavatelem, ale počítá se s využitím pro více rámu obdobné velikosti. Orientační vnější rozměry a předpokládaný způsob zatěžování rámu znázorňuje obrázek 10. Rám má kruhový průřez o průměru 42 mm a je vyráběn z různých druhů plastických hmot. Konkrétní materiál bude zvolen na základě zkoušek zadavatelem.



Obrázek 10: Náčrtek rámu pro ovíjení

3.2 Požadavky na ovin

Výsledná tuhost rámu závisí zejména na směru kladení vláken, protože nejvyšší pevnost je právě v jejich směru. Zvolené kladení vláken vychází z uvažovaného namáhání a požadavků zadavatele. Vlákná budou kladena nejprve v podélném směru a následně ve šroubovici pod úhlem 45° a -45° . Tyto tři vrstvy tvoří jednu společnou multivrstvu. Předpokládá se vytvoření 2 – 4 multivrstev na rámu. Podélná vlákna nejsou kladena po celém obvodu, ale pouze v určitých segmentech. Pro zadaný rám se vzhledem k šířce pásky z uhlíkových vláken předpokládá použití deseti cívek pro ovin pod úhlem 45° , stejný počet pro -45° a šest cívek pro podélná vlákna, viz obrázek 11. Úhel kladení vláken se musí nechat dát měnit, tak aby respektoval výsledky budoucích pevnostních analýz.



Obrázek 11: Předpokládaný způsob kladení vláken na rám

3.3 Cívky s uhlíkovými vlákny

V současné době se zabývá produkcí uhlíkových vláken ve formě pramenců několik výrobců zejména v Japonsku, USA a Německu. Dále pak ve Francii, Turecku, Maďarsku a Mexiku. Jedná se například o firmy Aksaca, Grafil, Hexcel, SGL Group, Tenax, Toray a Zoltek. Rozměry cívek jsou dány především historickým vývojem z leteckého průmyslu a u jednotlivých výrobců se liší pouze nepatrně. Pramence se označují podle počtu vláken v tisících na 24K, 30K, 48K či 50K, přičemž 48K často vznikají spojením dvou 24K. Dále se pramence rozlišují dle materiálu, zejména podle modulu pružnosti v tahu viz kapitola 1.2.3. Cena tzv. standardních uhlíkových vláken se pohybuje mezi 20-25 € za kilogram. Pro konstrukci zařízení byla vybrána cívka Tenax STS40 F13 24K 6kg, vyráběná v Německu. Tato firma vyrábí cívky v rozpětí od dvou do deseti kilogramů. Zadavatel vyžaduje možnost použití zařízení pro cívky s vlákny 24K i 48K. Cívky s větší hustotou se ale dodávají až od hmotnosti šesti kilogramů. Požadavek

na atypické velikosti návinu by představoval nárůst ceny materiálu. Z těchto důvodů byla vybrána právě šestikilová cívka, aby navrhnuté řešení bylo zcela nezávislé na zvoleném materiálu a využívalo standardních velikostí. Obdobná situace je i u ostatních firem. Přehled cívek různých výrobců a jejich základní parametry jsou uvedeny dále, viz příloha č. 2.

Samotný pramenec má tvar ploché pásky široké v případě 24K cca 15 milimetrů a u 48K 20 milimetrů. Materiál je opatřen apretační vrstvou, která chrání vlákna a zlepšuje kluzné vlastnosti. Tato vrstva ztrácí časem své vlastnosti, a proto nejsou cívky určeny k dlouhému skladování. Materiál není předipregnován vytvrditelnou složkou.



Obrázek 12: Cívky s uhlíkovými vlákny firmy Zoltek [19]

4 Volba technologie

Volba výrobní metody vychází z požadavků zadavatele. Splétání patří mezi hojně používané technologie při výrobě kompozitů, ale pro tuto konkrétní aplikaci není vhodné z několika důvodů. Jedná se o méně produktivní technologii a je značně náročné na konstrukci stroje. Vytváří sice složitější pletenou strukturu než požaduje zadavatel, ale není aplikovatelné na uzavřené rámy. Uzavřenost rámu a jeho nedovolené rozdělení vyřazuje i technologie s rotujícím jádrem, neboť rotace s uzavřeným rámem je prakticky nemožná. Pro řešení požadovaného ovinu pak zbyly metody ovíjení se statickým jádrem.

Ovíjení se statickým jádrem se jeví jako nejvhodnější technologie při požadovaných parametrech. Vzhledem k požadavkům na výkon se předpokládá kladení celé jedné multivrstvy najednou. Díky složitému tvaru rámu není možné použít způsobů s připravenou zásobou materiálu i s externím přívodem materiálu. Při současném kladení deseti pramenců do šroubovice by totiž docházelo k nerovnoměrné spotřebě jednotlivých pásek v zaobleních, což tyto technologie neumožňují. Zařízení eliminující tuto nevýhodu by vyžadovalo složitou konstrukci a potřebu více jednotkových pohonů. Navíc by v případě technologie s připravenou zásobou materiálu vznikla mezioperace prodlužující výrobní proces a zbytečně namáhající vlákna. U způsobu s externím přívodem materiálu by pak bylo velice složité až nemožné navazování přerušených vláken.

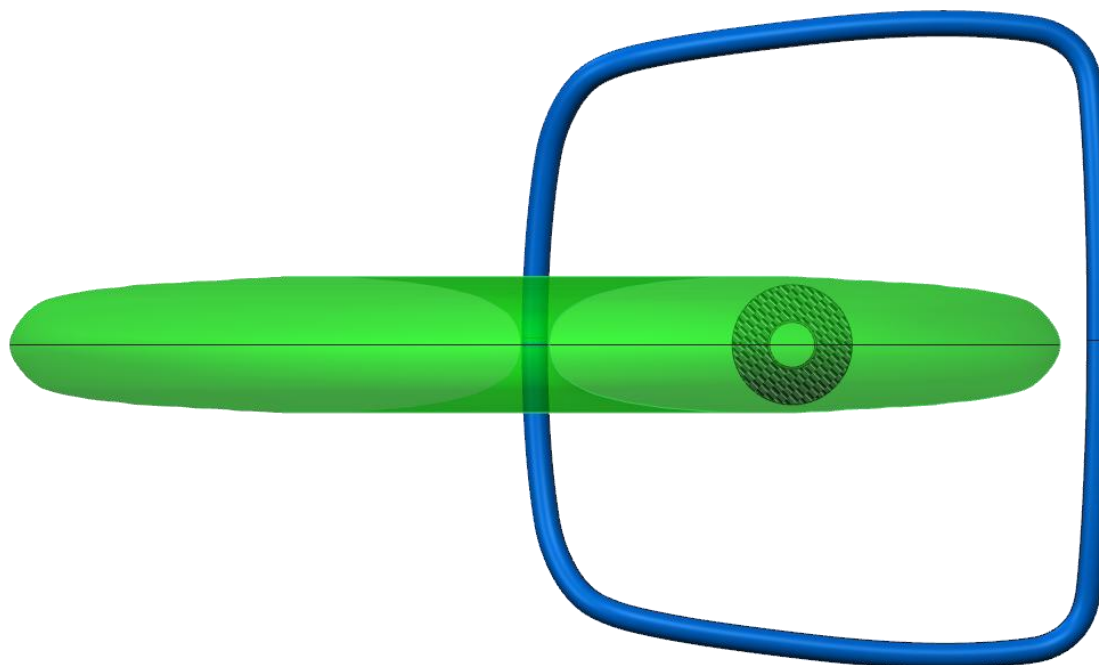
Vzhledem k zadání byla vybrána technologie ovíjení se statickým jádrem a rotujícími cívkami. Ta respektuje proměnlivé odvíjení vlivem tvarové složitosti rámu a nevyžaduje velké množství pohonů. Nevýhodou je velké zatížení zařízení, a tím nutná robustnost konstrukce. Pro zachování rovnoměrného tahu v pramencích během rotace se předpokládá pohyb místa ovinu po rotační ose cívek. Stanovení využitelného prostoru pro pohyb cívek bylo provedeno pomocí analýz. Ve zjištěném prostoru budou umístěny cívky tvořící šroubový ovin. Soustava s podélnými vlákny bude umístěna externě. Pohyb rámu bude uskutečněn pomocí soustavy tří robotů.

5 Prostorová analýza

Samotný rám je tvořen tažením kruhového profilu po prostorové křivce. Vzhledem ke složitosti tvořící křivky bylo provedeno několik analýz. Jednalo se o pohyb rámu v tečném směru, pohyb s povoleným odklonem a pohyb 2D průmětu rámu. Studie vycházejí z úvahy, ve které cívky neustále rotují v pracovním prostoru, ovíjené jádro se posouvá a místo ovíjení vždy leží na rotační ose cívek. Dále se předpokládá, že v pracovním prostoru budou uloženy cívky pouze pro ovin $\pm 45^\circ$ a cívky s podélnými vlákny se umístí externě. Pohyb robotů manipulujících s rámem bude velice složitý, proto se předpokládá co nejrovinnější manipulace, která nebude úplně respektovat tvar rámu.

5.1 Pohyb rámu v tečném směru

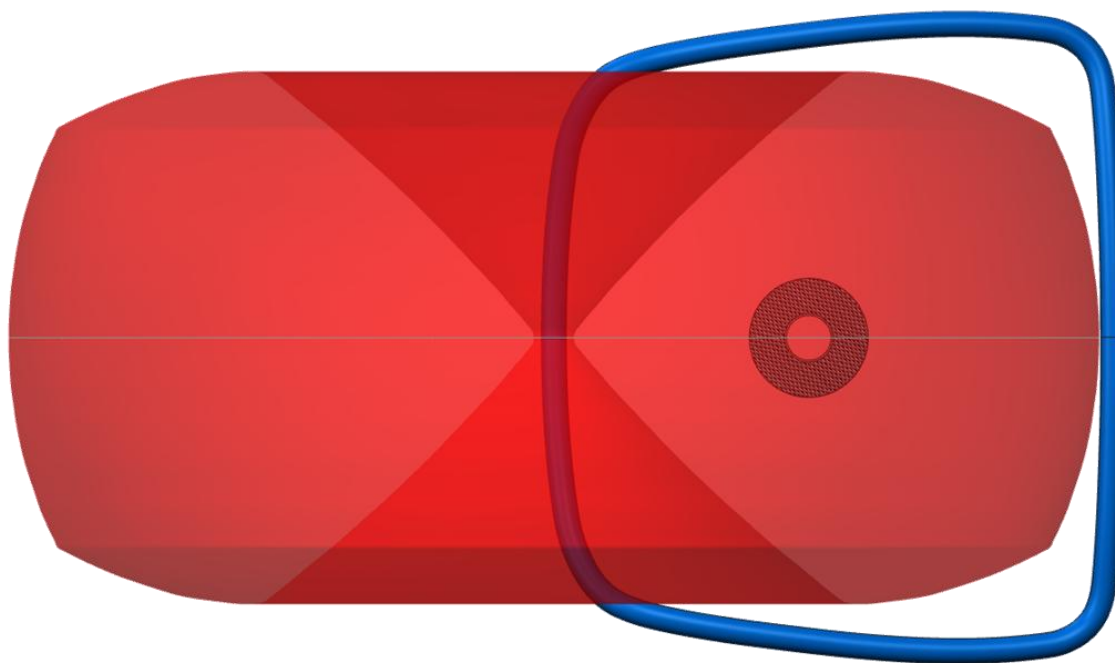
Ideálním případem pro tvorbu ovinu by byl ten, ve kterém by tvořící křivka byla v každém okamžiku tečná k ose rotujících cívek. Bohužel takto vzniklý prostor by poskytoval příliš málo místa pro jejich umístění. Při této analýze bylo povoleno natáčení rámu ve všech směrech, tak aby tvořící křivka rámu byla vždy tečná k ose rotujících cívek. To na rozdíl od následujících studií snižovalo zejména šířku prostoru. Obrázek 13 znázorňuje velikost tohoto prostoru s vloženým průřezem jedné cívky.



Obrázek 13: Pracovní prostor při tečném pohybu

5.2 Pohyb rámu s povoleným odklonem

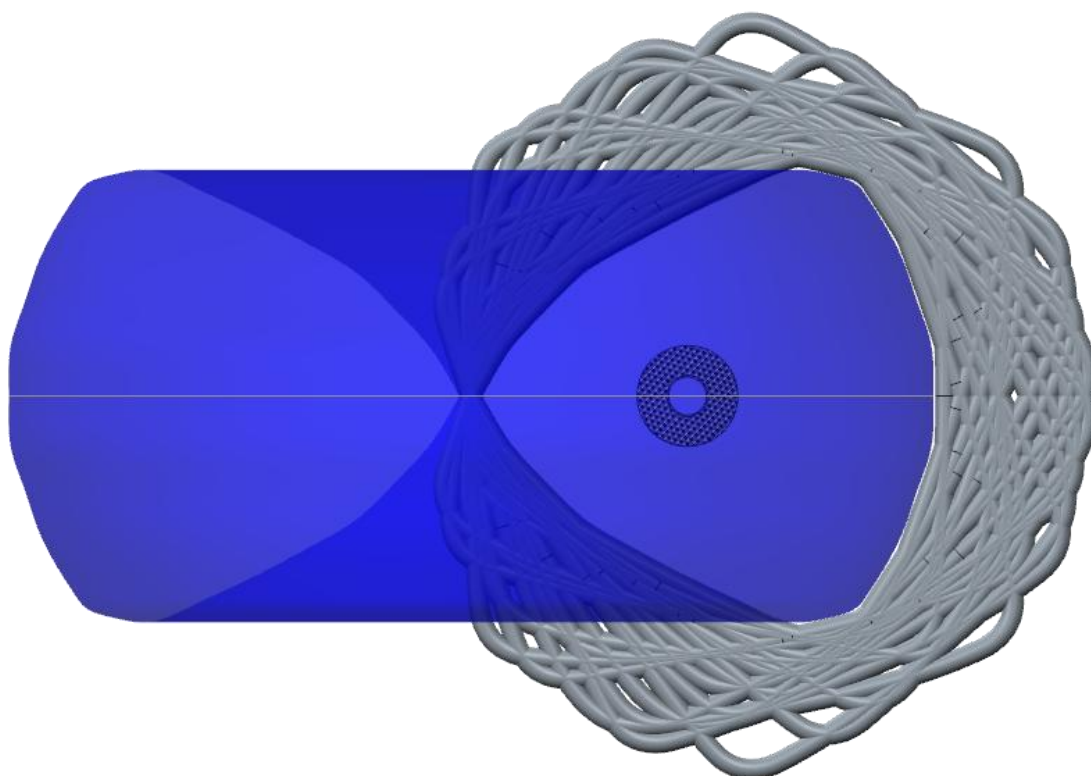
Pro dosažení většího pracovního prostoru bylo v této analýze umožněno odklonění tečny křivky ovíjeného jádra od osy rotujících cívek. Pohyb geometrického středu rámu byl zafixován pouze pro posun po horizontální ose symetrie pracovního prostoru. Díky tomu byl pohyb rámu mnohem rovinnější, a tím příznivější k pohybu robotů. K tečnosti rámu ale dochází pouze ve čtyřech bodech, ve všech ostatních je odkláněn. Jak znázorňuje obrázek 14, pracovní prostor bez zachování tečnosti narůstá do mnohem větších rozměrů.



Obrázek 14: Pracovní prostor při dovoleném odklonu

5.3 Pohyb 2D průmětu rámu

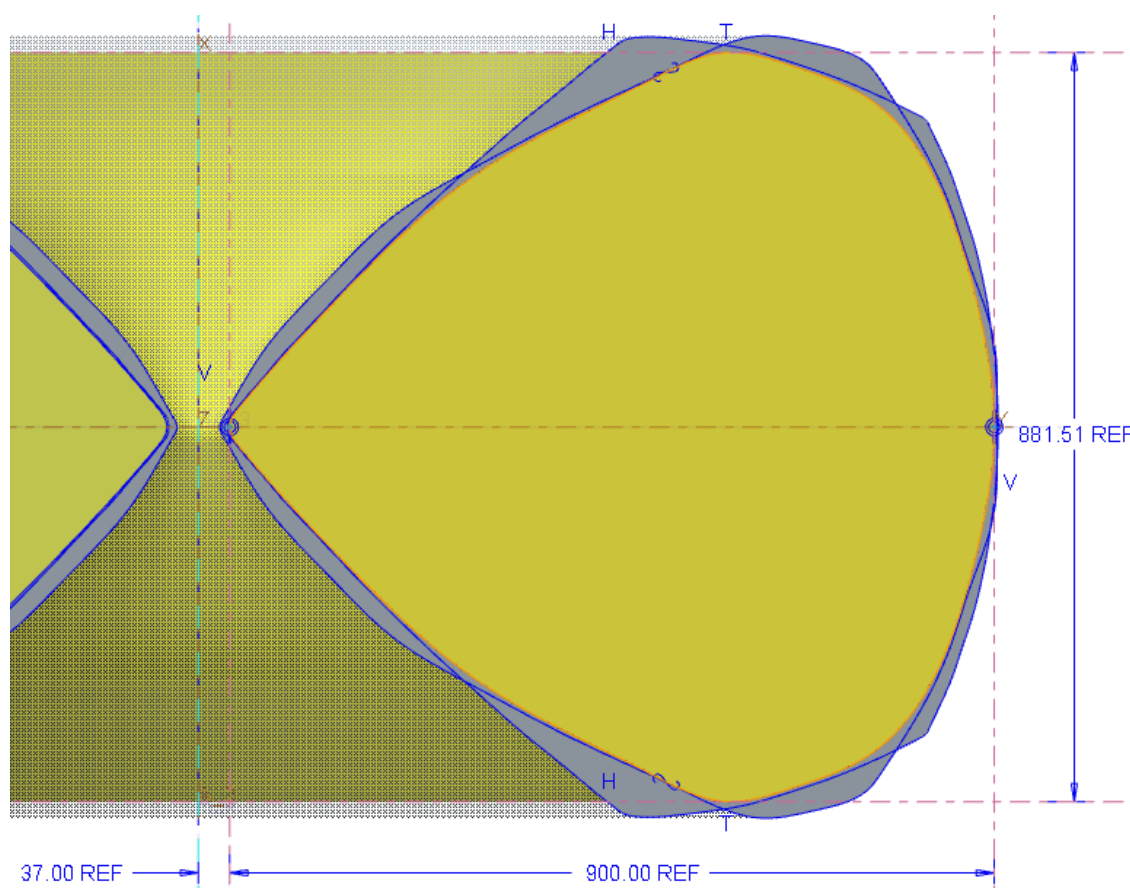
Analýza z kapitoly 5.2 sice vytváří mnohem větší prostor pro umístění cívek, ale vzhledem ke složitosti tvořící křivky je obtížné definovat velikost odklonu. Samotný odklon od tečného směru může, ale nemusí mít negativní vliv na vlastnosti budoucího ovinu. To bude předmětem analýz a testů na funkčním modelu stroje. Pro stanovení přibližného odklonu byl vzhledem k relativně rovinné robotické manipulaci s rámem vytvořen 2D průmět tvořící křivky, po němž byl následně tažen profil rámu. Samotný rám tak byl převeden z prostorového případu na rovinný. Po konzultaci se zadavatelem byla stanovena maximální dovolená odchylka od tečného směru 25 stupňů. K tomuto odklonu dochází poblíž ostřejších rohů rámu s malým poloměrem. Výslednou velikost pracovního prostoru znázorňuje obrázek 15.



Obrázek 15: Pracovní prostor z 2D analýzy

5.4 Porovnání pracovních prostorů

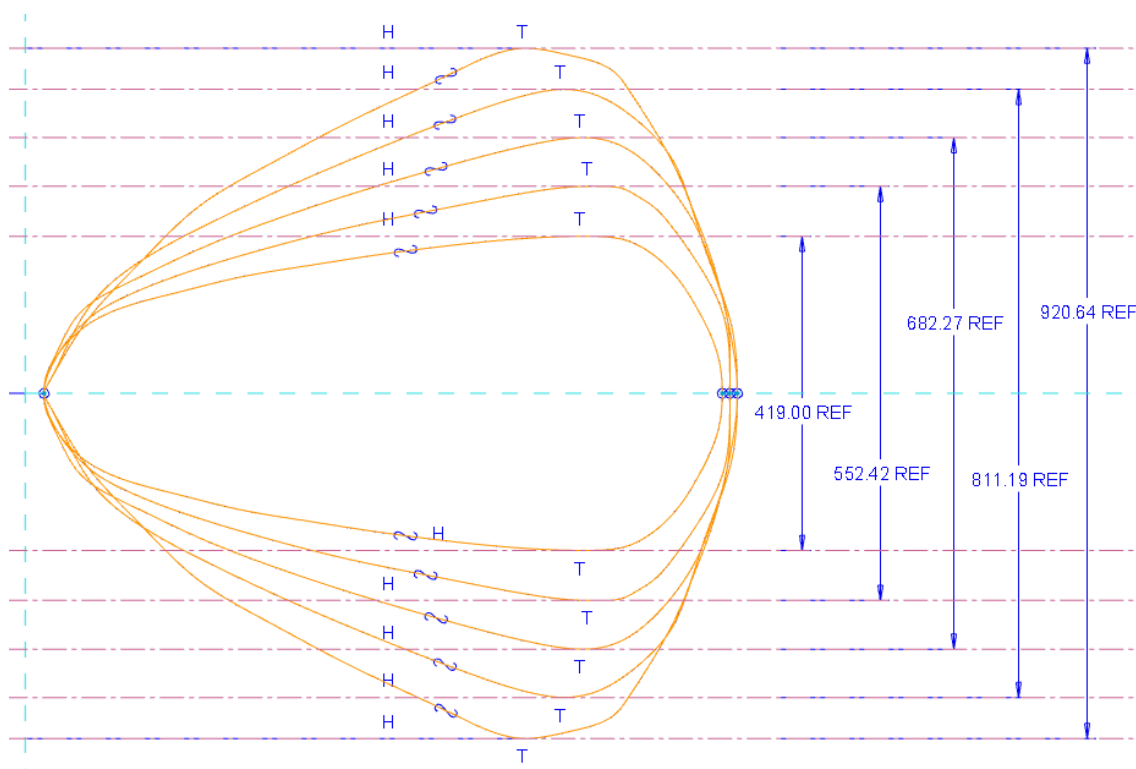
Výsledný pracovní prostor vznikl spojením obálek z analýz uvedených v kapitolách 5.2 a 5.3. Obrázek 16 znázorňuje žlutou barvou velikost výsledného balónu. Jedná se o maximální využitelnou pracovní oblast. Při použití stroje pro jiný typ rámu menších rozměrů nastane zmenšení průměru i výšky balónu. Předpokládá se ale využití zařízení pro obdobně velké rámy. Mnohem radikálnější je snižování výšky balónu při požadavku na menší odklon rámu od tečného směru. Dále je nutné pamatovat na robotickou manipulaci s rámem, kdy koncové uchopovače budou zasahovat do pracovního prostoru.



Obrázek 16: Výsledná maximální velikost pracovního prostoru

Z obrázku maximální velikosti pracovního prostoru je patrné, že se prostor 2D analýzy významně neliší od složitější prostorové, a proto můžeme použít tento zjednodušující předpoklad k dalším úvahám. Vlákna z cívek se totiž přivádějí k jádru rámu pomocí naváděcího ústrojí, které může být statické nebo společně rotovat s cívkami. Statické naváděcí ústrojí může plnit nejen vodící funkci, ale zároveň může kompenzovat odklon rámu od tečného směru, čehož lze dosáhnout natáčením vodících prstenců. Kompenzaci lze provést také pomocí vzájemné regulace otáček rotujících cívek a pohybujícího se rámu. Změnou otáček ale zlepšujeme vlastnosti pouze jedné soustavy, na druhou má opačný, zhoršující efekt. U statického ústrojí dochází ke smýkání vláken po naváděcích prstencích. To může mít za efekt nejen poškození vláken, ale i deformaci pásky, což by nepříznivě ovlivnilo vlastnosti ovinu. Význam tohoto jevu bude muset být otestován na funkčním modelu. Pro následující konstrukci se předpokládá použití rotujícího naváděcího ústrojí, jelikož ochrana vláken má větší prioritu. V tomto případě ale již ústrojí nemůže kompenzovat odklon od tečného směru. Stanovení významu odklonu na kvalitu návínu bude vycházet z řady budoucích analýz a výpočtů, které nejsou součástí této práce. Předpokládá se ale, že odklon bude mít negativní vliv. Dovolenu hodnotu ze strany zadavatele tak lze brát pouze jako

odhad. Snahou návrhu je pak minimalizace potřebného odchýlení. Z těchto důvodů bylo vytvořeno několik 2D analýz s odlišným odklonem rámu od tečného směru. Obrázek 17 znázorňuje velikosti pracovních prostorů při odklonu 5, 10, 15, 20 a 25 stupňů (číslováno směrem vně).



Obrázek 17: Pracovní prostory při různé velikosti odklonu

Výsledná velikost pracovního prostoru tedy vychází z kombinací několika analýz. Maximální pracovní oblast dle požadavků zadavatele znázorňuje obrázek 16. Z předpokladů uvedených v předchozím odstavci ale vyplývá, že snahou navrhovaného řešení je nevyužití celého tohoto prostoru. Naopak pramení snaha o maximální kompaktnost rozmístění cívek. Zvýší se tím univerzálnost zařízení i možnosti samotného ovinu.

6 Konstrukce zařízení

6.1 Požadavky na rychlost stroje

Z požadavků zadavatele vychází časový limit na tvorbu ovinu. Během čtyř minut má zařízení vytvořit až čtyři multivrstvy ovinu, tudíž minimální rychlost rámu se pohybuje na hodnotě jedno otočení rámu za minutu. Ovíjený rám je tvarově složitý a stanovení spotřeby materiálu obtížné. Pro zjednodušení bylo uvažováno dokonalé ovinutí a nezahrnoval se překryv pásek v rozích. Dále se pro zjednodušení předpokládala rovnoměrná rychlost pohybu rámu. V praxi se sice bude rám v rovinných úsecích pohybovat rychleji a v rozích naopak zpomalovat, ale pro předběžné kalkulace je toto zjednodušení akceptovatelné. Základní parametry rámu uvádí tabulka 3.

Tabulka 3: Základní parametry zařízení a ovíjeného rámu

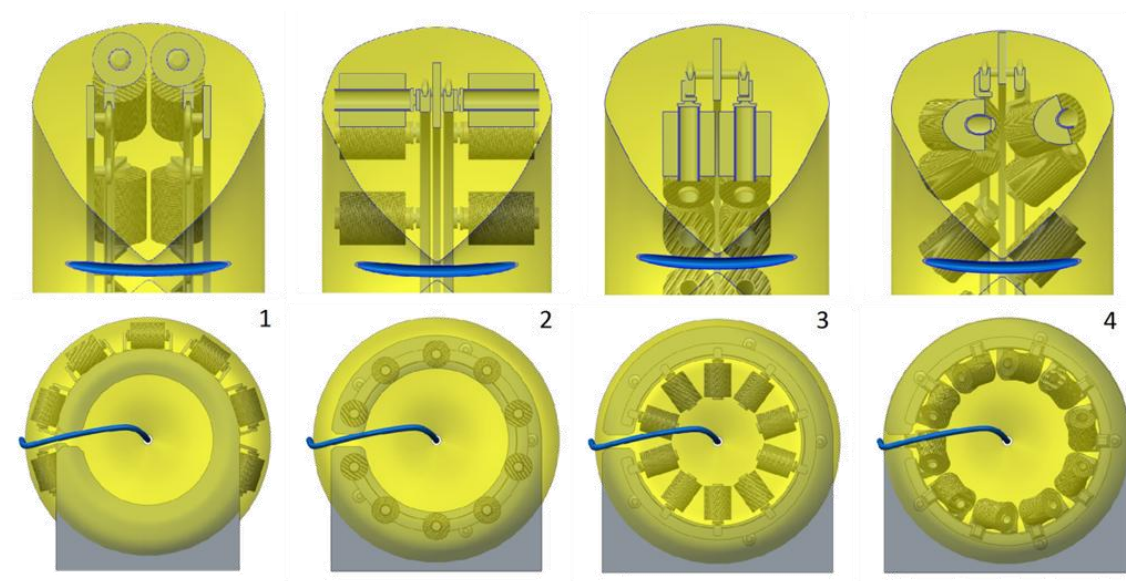
Údaje o rámu	Plocha povrchu [m ²]	0,512
	Délka tvořící křivky[m]	3,7
	Průměr profilu rámu [m]	0,042
Parametry zařízení	Rychlost pohybu rámu [mm/s]	61,8
	Otáčky rotujících cívek [1/min]	28,1
	Vydatnost cívky pro vlákna pod úhlem [ks]	178
	Rychlost odvinu materiálu z cívky [mm/s]	87,4

Spotřeba materiálu na podélný ovin vychází z délky tvořící křivky. Kalkulace ovinu pod úhlem 45° vychází z několika následujících předpokladů. Zařízení je navrženo na práci s pramenci 24K i 48K. Páska hustějšího pramence má větší šířku (20 mm oproti 15 mm). Naváděcí ústrojí zařízení může a nemusí pásy shrnovat či rozšiřovat. Předpokládá se ale spíše shrnutí a proto bylo zvoleno použití deseti cívek pro jeden směr ovinu, kdy při zvoleném rámu vychází šířka již navinuté pásky na 9,33 mm pro dokonalé zakrytí jádra. Spotřeba materiálu byla stanovena z velikosti plochy rámu, která lépe vystihuje tvarovou složitost. Plocha byla vydělena šířkou navinuté pásky a počtem cívek. Ze spotřeby materiálu byla stanovena rychlost odvinu z cívek i jejich vydatnost. Rychlost pohybu rámu byla stanovena za předpokladu konstantní rychlosti z tvořící křivky. Otáčky stroje vycházejí z délky tvořící křivky a stoupání šroubovice pod úhlem ovinu. Kvůli zjednodušení se zanedbává složitá situace v rozích. Všechny získané hodnoty uvádí tabulka 3. Rychlost odvíjení, a tím i spotřeby materiálu je vyšší u vláken pod úhlem, proto nejsou hodnoty podélných vláken v tabulce uvedeny. Pro řadu zjednodušení je nutné brát data jako orientační, pro hrubou představu o vlastnostech navrhovaného zařízení.

6.2 Rozmístění cívek

Pro stanovení optimálního rozmístění cívek bylo vytvořeno několik schematických variant i s názorným uložením rotujících prstenců, na nichž jsou cívky umístěny. Varianty vycházejí zejména z vhodnosti orientace cívky vzhledem k navádění. Uhlíkové pramence jsou sice opatřeny apretační vrstvou, ale při velkém kontaktu s jiným materiálem dochází k poškození vláken a jejich lámání. Pro eliminaci tohoto problému se uvažuje přímé odvíjení z cívek a průchod minimálním počtem naváděcích ústrojí.

Obrázek 18 znázorňuje různé polohy cívek. Vzhledem k navádění je nejvhodnější varianta 4, kdy dochází k nulovému zkrutu pásky za předpokladu ideálního naváděcího ústrojí. U variant 1 a 2 dochází ke stejnému zkrutu o 45° a nejméně výhodná je z tohoto pohledu varianta 3. Z hlediska výměny cívek je nejprůvětivější varianta č. 2, následně 4 a nejhůře varianty 1 a 3. Vzhledem k prostorové náročnosti je pak nejlepší varianta č. 1. Právě na tento parametr byl brán největší zřetel, jelikož se ukázalo, že malý zkrut vláken při navádění má zanedbatelný vliv. Pro další zpracování tedy byla vybrána varianta č. 1. Nejlépe využívá pracovní prostor a příliš nezkrucuje vlákna při navádění. Důvody pro minimalizaci využití pracovního prostoru jsou uvedeny v kapitole 5.4.



Obrázek 18: Varianty polohy cívek

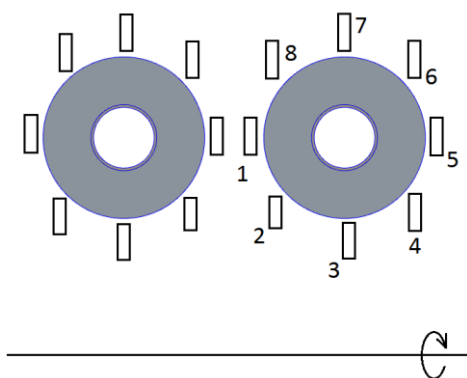
6.3 Uložení prstence s rotujícími cívkami

Poloha cívek byla stanovena v předchozí kapitole. Aby bylo možno vložit ovíjený rám do stroje, musí být zařízení rozděleno. Rotující prsteneček je tedy rozříznut a má tvar písmene C. Při dělení prstence a velkém průměru je prakticky nemožné použít jiného uložení než uložení do systému vodících kladek. U velkopřůměrových textilních strojů

se s oblibou používají drátová ložiska, ale jejich použití u této aplikace je taktéž nepřijatelné. S uložením úzce souvisí i konstrukce držáků cívek a způsob pohonu.

Velikost rotující hmoty je dána geometrií zvolených cívek. Pokud bychom uvažovali samotné cívky a nezahrnovali prostor pro vložení ovíjeného rámu, vznikne uspořádání cívek do kruhu, jehož průměr se rovná přibližně jednomu metru. Zakládání rámu a nosiče cívek vyžadují určitý prostor, a proto musí být průměr zvětšen. S nárůstem průměru vzrůstají setrvačné účinky. Ideální poloha cívek v pracovním prostoru při zvoleném uspořádání vychází na průměru v rozsahu 1,1 až 1,5 metru. Výroba takto velkých prstenců je velice náročná a specializuje se na ni jen několik firem. Jednou z nich je společnost HepcoMotion. Ta dodává celý systém rotujících prstenců, včetně jejich uložení, pohonu i mazání. Jelikož navrhované zařízení představuje prototyp, vyplatí se snaha o využití již vyráběných dílů, zvláště u takto složitých součástí. Proto byla volba uložení přizpůsobena vyráběným velikostem, konkrétně těžší řadě HDRT. Prstence se ukládají v kladkách (na vnitřním nebo vnějším obvodu) a na opačné straně se nachází ozubení pro jejich pohon.

Obrázek 19 znázorňuje různé rozmístění prstenců vzhledem k cívkám. Ve volbě optimální pozice je nutné uvažovat možnosti následného pohonu, nároky na prostor, náročnost na konstrukci držáků cívek, velikost samotného prstence a řadu dalších důvodů. Jako optimální se jeví varianty 3 a 5. Následně byly tyto možnosti rozpracovány do konkrétnější podoby a opět porovnány. Varianta 3 (obrázek 20) sice byla méně náročnější na prostor, nicméně hlavně z důvodu uchycení cívek byla vybrána varianta číslo 5 a dále zpracovávána. Při použití prstenců od firmy HepcoMotion by totiž u varianty č. 3 bylo nutné obejít držákem vnější kladky či pastorek. Navíc by docházelo k většímu zanášení uložení během činnosti. Dalším důvodem pro volbu varianty č. 5 byla možnost lepšího doplňkového uložení v případě deformace rámu. Pro vytvoření dostatečného prostoru ke vložení rámu a současném zachování kompaktnosti návrhu bylo přistoupeno k nesymetrickému rozložení cívek po obvodu prstence.



Obrázek 19: Schematické znázornění variant poloh prstenců k cívkám

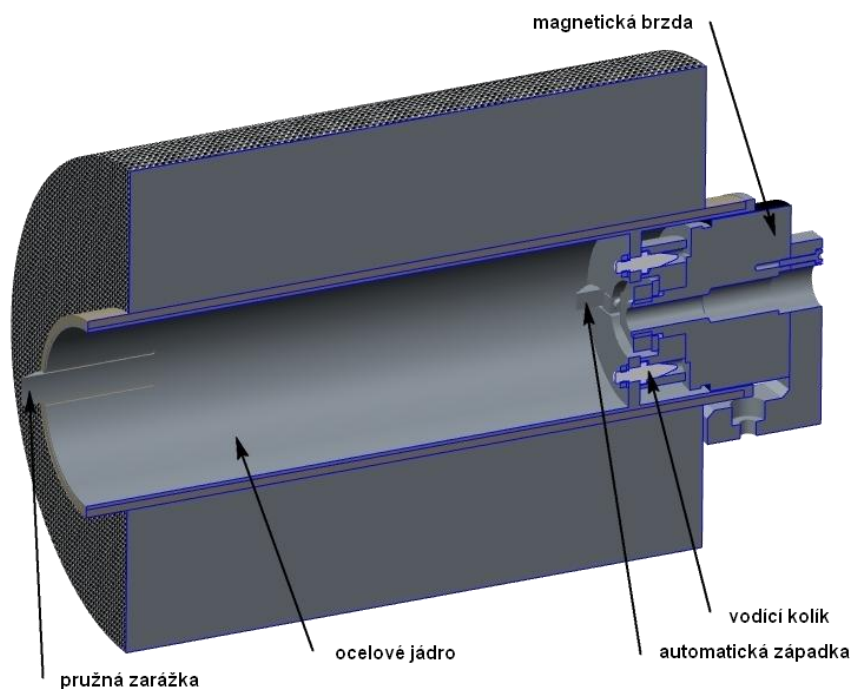


Obrázek 20: Rozmístění cívek nad rotujícím prstencem, varianta č. 3

6.4 Konstrukce držáků cívek

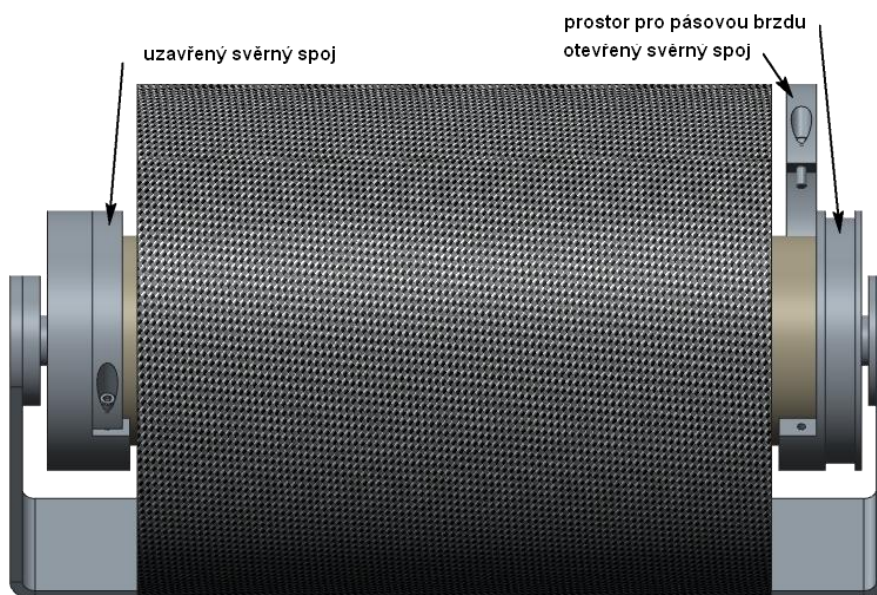
Tvar držáku cívky silně závisí na poloze prstence. Uchycení cívek může být letmé nebo oboustranné. Do držáku navíc musí být integrována brzda, aby se cívka při odvíjení vlastní setrvačností neroztočila. Brzda zároveň vytvoří napětí v pramenci. V současné době zadavatel testuje velikost potřebného tahu a jeho vlastnosti na ovin. Následně se určí zda postačí brzdit pouze cívku nebo bude probíhat další brzdění v naváděcím ústrojí. Pro tvorbu prototypu nebude uvažována brzda s konstantním tahem, ale jednoduchá magnetická či pásová brzda. Z budoucích analýz se ukáže, zda nekonstantní síla v pramenci má vliv na vlastnosti ovinu či nikoliv. Bylo vytvořeno několik variant držáků cívek uvažujících různé polohy prstence i různé způsoby brzdění. Mezi uvažované způsoby patřilo i uchycení pomocí výměnných kazet, kdy se cívka vyjímá z držáku až mimo stroj. To řešení ale bylo zavrhnuto z důvodů vysoké ceny a zdlouhavého procesu výměny.

Obrázek 21 znázorňuje letmou variantu držáku s integrovanou magnetickou brzdou. Prostor pro vkládání a vyjímání je poměrně malý a při zvoleném uložení omezující. Cívka je uložena na kovovém kuželu s malým úhlem a navíc zajištěna pružnou zarážkou. Samotná brzda je pevně přichycena ke stroji a vyjímá se pouze cívka s kovovým jádrem. Spojení jádra s brzdou využívá vodících kolíků a automatických západek. Vzhledem k hmotnosti cívky a náročnosti tohoto uložení bylo od této varianty upuštěno.



Obrázek 21: Letmé uložení cívky s integrovanou magnetickou brzdou

Druhá varianta uchycení využívá obruby po stranách cívky, viz obrázek 22. Dle dat od výrobců má dutinka vyčnívat na každé straně o 18mm. Držák svěrným spojem zachytí dutinku a zároveň je na jedné straně opatřen prostorem pro pásovou brzdu. Tento způsob uchycení je nenáročný na prostor, spolehlivý, ale relativně pomalý z hlediska zakládání cívek. Pro urychlení výměny mohou být šrouby nahrazeny rychloupínáky. Největší výhoda spočívá v nezávislosti na poloze umístění vzhledem k prstenci. V průběhu testování materiálu (po dodání několika cívek) bylo zjištěno, že okraje dutinek nejsou stejně velké a uchycení tímto způsobem by bylo nepraktické.



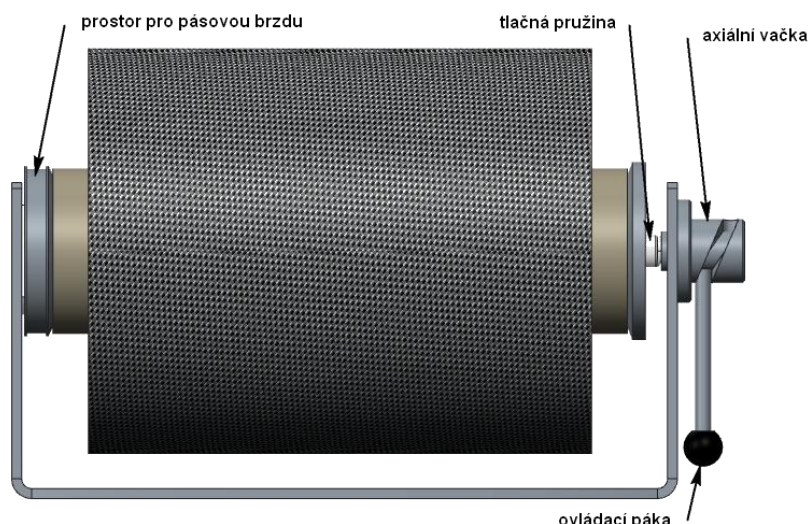
Obrázek 22: Držák cívky se svěrným spojem

Další způsob uchycení cívky se běžně používá v textilním průmyslu. Jedno z ramen svírajících cívku je odklopné a potřebný přítlak vytváří pružina. Vzhledem k možné horizontální orientaci osy stroje musí tato pružina zajistit stabilní přítlak v každé poloze, a to i v nepříznivém případě, kdy proti ní působí samotná cívka vlastní vahou. Z těchto důvodů musí mít pružina vysokou konstantu. To negativně ovlivňuje zakládání cívky, jelikož pro otevírání držáku je potřeba velké síly. Vzhledem k tomu, že prostor mezi cívkami je minimální, zhruba na velikost prstů, je tento způsob nevhodný. Při použití slabší pružiny není zajištěn potřebný přítlak a hrozí prokluz mezi cívkou a brzdou. Prostorová náročnost tohoto řešení je obdobná jako u předchozího systému. Konstrukci držáku tohoto typu znázorňuje obrázek 23.



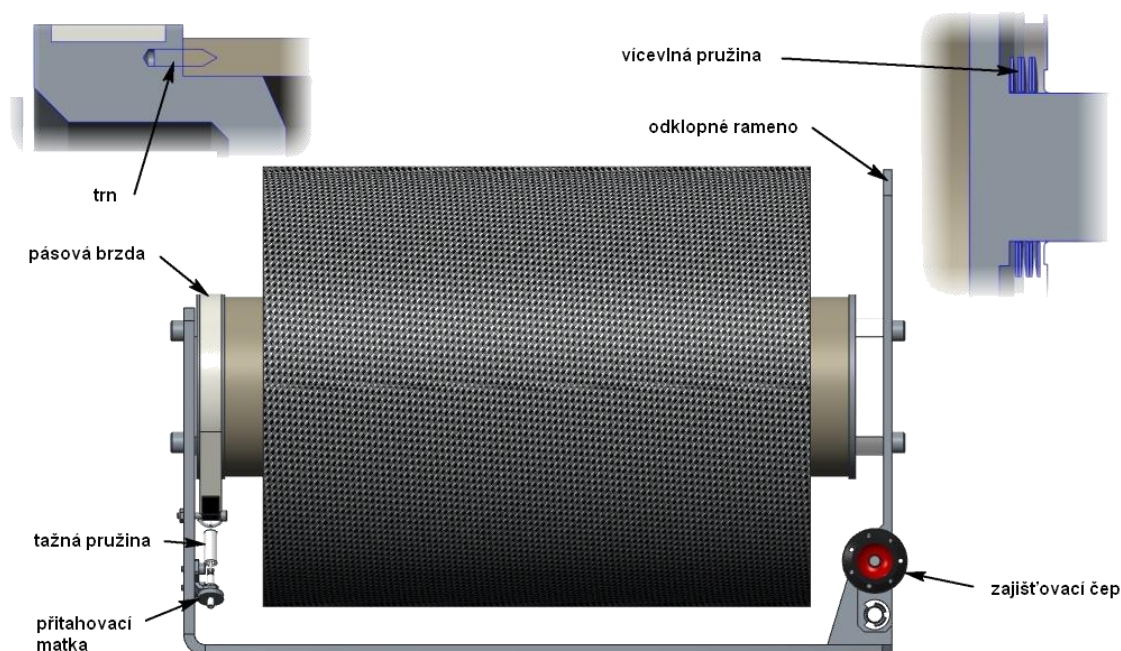
Obrázek 23: Držák cívky s přítlačnou pružinou

Pro eliminaci nevýhod držáku s přítlačnou pružinou vznikla varianta využívající jednoduché axiální vačky (obrázek 24). Ramena držáku jsou obě pevná a samotné upínání je prováděno pohybem ovládací páky v drážce vačky. V přítlačném kuželu je integrována pružina, zajišťující stálý přítlak i v průběhu rotace. Zdvih pružiny je malý, pouze pro potřebu přítlaku. Tento způsob upínání vyžaduje větší prostor, jelikož je potřebná dvojnásobná dráha pro potřebný pohyb. Při následných pokusech o jeho použití na konkrétním prstenci bylo zjištěno, že je nemožné jeho použití právě z těchto důvodů.



Obrázek 24: Držák cívky s vačkovým upínáním

Výsledný tvar držáku zohlednil fakt, že zařízení je ve fázi prototypu. Neklade tak velký důraz na rychlost výměny, ale na jednoduchost konstrukce a spolehlivost uchycení. Klasická pružina byla nahrazena speciální vícevlnou pružinou která umožňuje na malém prostoru vyvinout potřebnou sílu i zdvih. Pružina vytváří přítlak zamezující pohybu cívky a kompenzuje případné odchylky ve výšce dutinek. Poloha výklopného ramene se zaaretuje zajišťovacím čepem s tlačítkem. Přenos brzdícího účinku na cívku se provádí trny umístěnými na straně brzdy. Ty se při zakládání cívky zaříznou do papírové dutinky cívky a zajistí spolehlivý přenos brzdného účinku. Velikost brzdící síly je modifikovatelná tuhostí tažné pružiny a jemně nastavitelná přitahovací matkou. Jedná se o prostorově nejméně náročné řešení jehož vzhled zobrazuje obrázek 25.



Obrázek 25: Vzhled výsledného držáku cívky

6.5 Orientace zařízení

Navrhované zařízení může mít osu rotace cívek umístěnou horizontálně či vertikálně. Z hlediska konstrukce rámu, namáhání vodících kladek i samotného prstence je příznivější vertikální poloha. Při uchycení různých držáků cívek k prstencům, bylo zjištěno, že nezávisle na způsobu připevnění se pohybuje vnější průměr cívek uspořádaných na kružnici přibližně na hodnotě 1,4 metru. I přes budoucí automatizaci zařízení se předpokládá nutnost občasného přístupu obsluhy do středu stroje, zvláště ve fázi testování prototypu. Takto velký průměr již znemožňuje pohodlný přístup, a proto byla vybrána horizontální orientace osy. Jednou z výhod tohoto uspořádání je i snazší umístění robotů pro manipulaci s ovíjeným rámem a nižší zástavbová výška stroje.

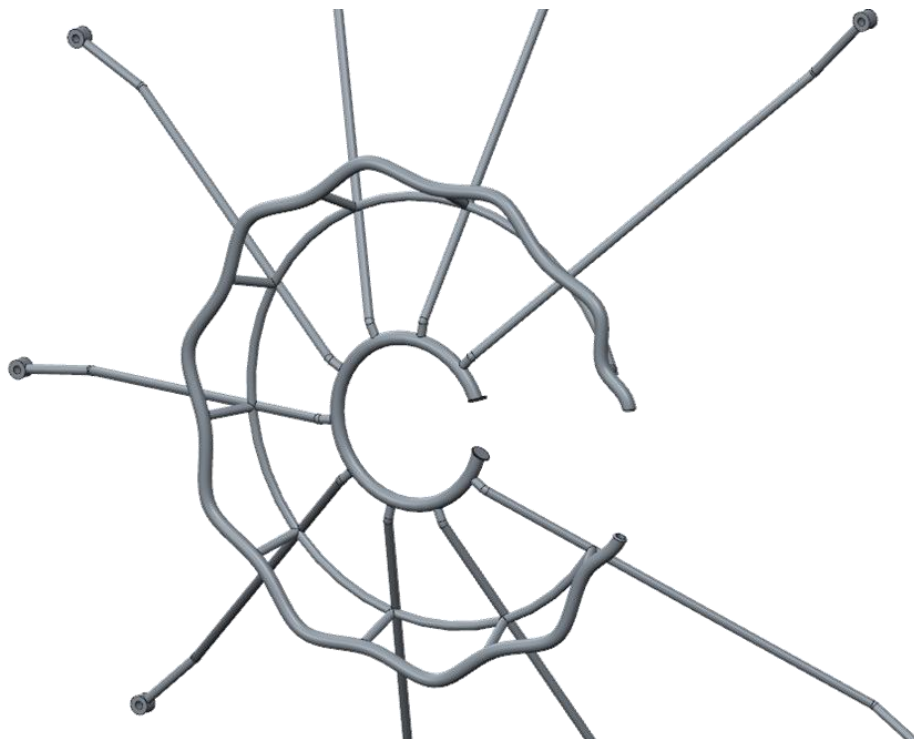
6.6 Konstrukce naváděcího ústrojí

Naváděcí ústrojí ovlivňuje podstatně kvalitu návinu. Konečná podoba této části zařízení je silně závislá na zvoleném materiálu a také na podmínkách ovinu. Chování pásky je obtížně teoreticky stanovitelné, a proto bude tuto část nutno podrobit řadě praktických testů.

U klasických splétacích strojů tvoří naváděcí ústrojí několik stacionárních prstenců. Navrhované zařízení však vyžaduje vkládání uzavřeného rámu, takže naváděcí soustava musí být dělená nebo otevřená. Dělené navádění sebou nese potřebu mezioperace otevírání a uzavírání, takže při návrhu byla snaha o konstrukci otevřené soustavy. Navíc navrhované zařízení počítá s rotací naváděcí soustavy společně s cívkami, aby nedocházelo k poškozování a shrnování vláken při smýkání. Z tohoto důvodu není možné přivádět energii na soustavu během rotace.

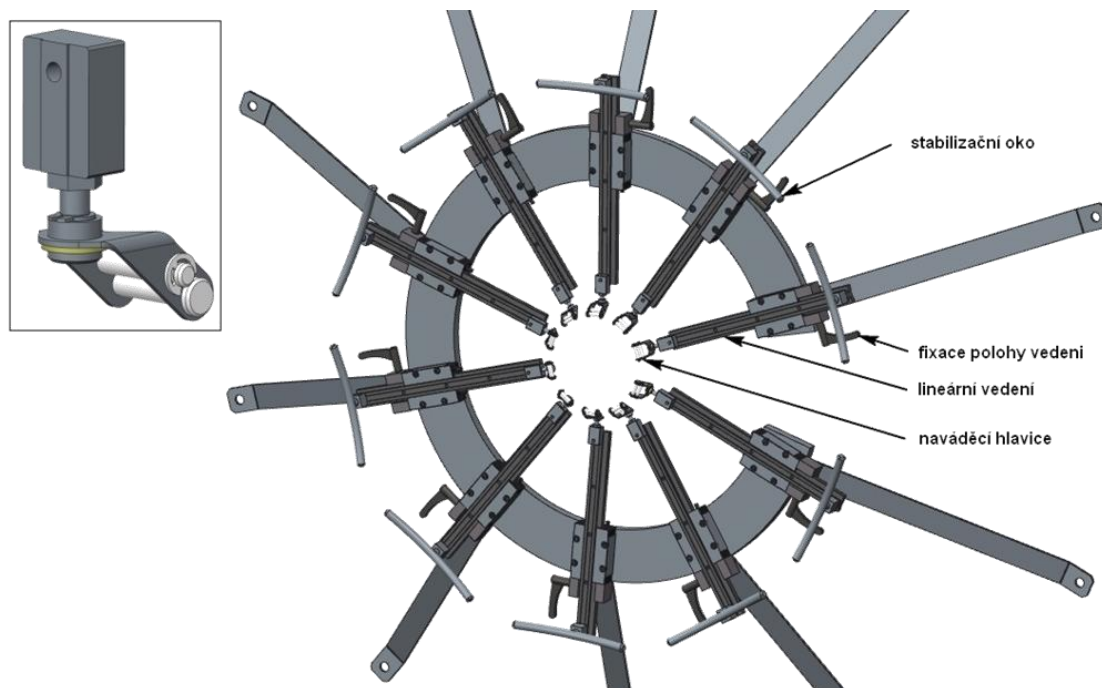
Naváděcí ústrojí můžeme rozdělit na pasivní a aktivní. Aktivní se odlišuje tím, že mění své parametry podle potřeb ovinu. Nejprve byla vyhotovena varianta zastupující pasivní navádění (obrázek 26). Skládá se ze svařených trubek a tyčí. Problémem při konstrukci naváděcí soustavy je stanovení přesné polohy pásky. Z tohoto důvodu stabilizuje pásku při odvíjení první soustava skládající se z vlnovce. Dále vlákna prostupují přes vnitřní kroužek, ze kterého pokračují na jádro rámu. Konkrétní tvar prstence i vlnovce je nutné stanovit z praktických testů. Zásadní bude chování pásky při ovíjení v rozích, kdy se očekává větší sklouzávání po vnitřním prstenci. Přesnou polohu pásky je nutno stanovit nejen pro otevřený systém, ale i pro případ dělení, abychom zjistili polohu dělicí roviny. Vlákna jsou totiž velmi jemná a i sebemenší nerovnost může vést k jejich zachycení. Rozměry navrhnutého řešení byly stanoveny tak, aby vznikl prostor pro vložení rámu bez nutnosti dělení. Jelikož obě soustavy rotují proti sobě, jsou vůči sobě pootočený a během zakládání se musí s prstenci otočit tak,

aby vznikl potřebný prostor. Nevýhoda tohoto řešení spočívá v tom, že naváděcí soustava musí být navrhována pro konkrétní rám a parametry ovinu. Zvláště pro fázi prototypu je tak tento způsob navádění nevhodný.



Obrázek 26: Naváděcí pasivní soustava pro jeden směr ovíjení

Mnohem více možností poskytuje soustava aktivní (obrázek 27). Vlákna se přivádí přes stabilizační oka na koncové hlavice, které se mohou otáčet a respektovat tím úhel ovinu. Pro zařízení ve fázi prototypu byla navrhována aktivní soustava pouze s otočnými hlavicemi, jejichž vzdálenost od jádra lze manuálně seřadit pomocí kluzných lineárních vedení. Díky prostupu vláken přes hlavici víme přesnou polohu pásky. Dovolená rotace hlavic navíc umožňuje nezávislost naváděcí soustavy na tvaru rámu i parametrech ovinu. Z těchto důvodů bylo vybráno právě řešení s aktivním naváděním. Prostor pro vkládání rámu se utvoří dostatečnou vzdáleností hlavic od rámu. V budoucnu ale může aktivní soustava plnit mnohem více funkcí. Použitím pneumatických rychlospojek může být v okamžiku zakládání rámu přiveden na naváděcí soustavu tlakový vzduch. To by umožňovalo navrhnout zařízení, které by plnilo například funkce zachycení vláken, jejich odstříhnutí i přichycení na nově vložený rám. Dále by bylo možné přiblížit hlavice co nejblíže rámu a při vyjímání rámu je pneumaticky vysunout. Konstrukce takového mechanismu by byla velice složitá a není součástí této práce.



Obrázek 27: Aktivní naváděcí soustava pro jeden směr ovíjení a detail hlavice

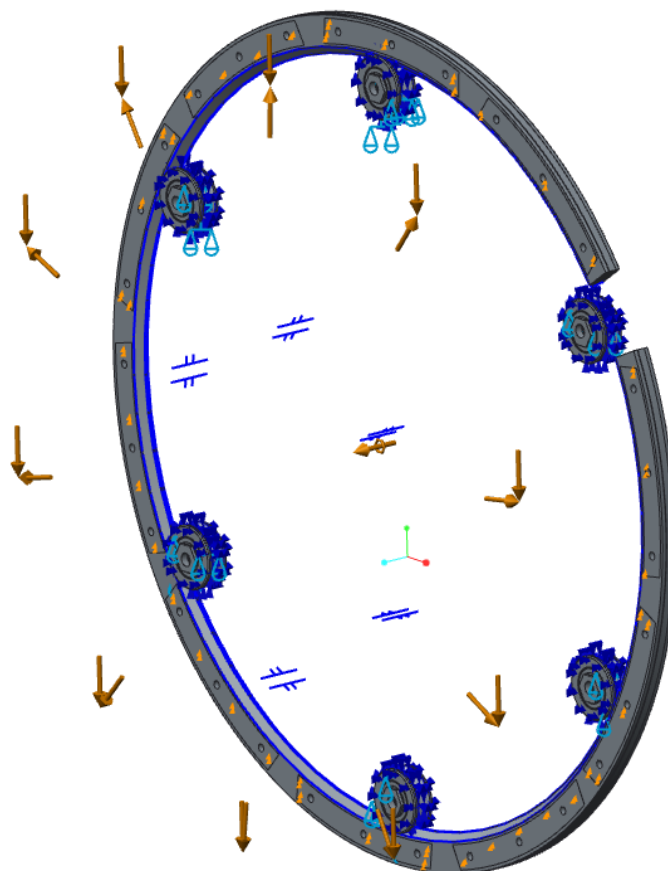
6.7 Deformační analýza rotujícího prstence

Rotující prstence firmy HepcoMotion se běžně používají uzavřené, bez výřezů. Rozříznutím ztrácí segment svoji pevnost a dochází k jeho deformaci. Velikost deformace pak značně ovlivňuje způsob jeho uložení a vedení. Z vnější strany prstence se standardně vyrábí evolventní ozubení, to bylo odstraněno a průměr o příslušný rozměr zmenšen. Ozubení má totiž pro analýzy zanedbatelný vliv a zbytečně prodlužuje dobu výpočtu. Všechny analýzy byly provedeny pomocí softwaru PTC Creo Simulate 2.0.

6.7.1 Namáhání prstence

Dominantní namáhání prstence vyvoluje k němu připevněná hmota. Jedná se zejména o držáky cívek (včetně cívek), které vlivem gravitace a odstředivé síly mají tendenci prsteneč roztahovat. Naváděcí ústrojí a síla při odtahu z cívek mají menší vliv, prsteneč spíše stahují, a proto je můžeme zanedbat. Na modelu prstence byly vytvořeny plochy, na něž se aplikovalo zatížení. Každá plocha představuje oblast kontaktu mezi prstencem a příslušným držákem. V těžišti každého držáku byl vytvořen bod, do kterého se umístilo zatížení a aplikovalo se na příslušnou plochu. Jednalo se o gravitační a odstředivou sílu vyvolanou držákem včetně cívky. Dále byla aplikována rotace, aby odstředivá síla působila i na prsteneč. Mezi kladkami a prstencem byl vytvořen kontakt. Samotné kladky se uvažují jako dokonale tuhé a na povrch kladek

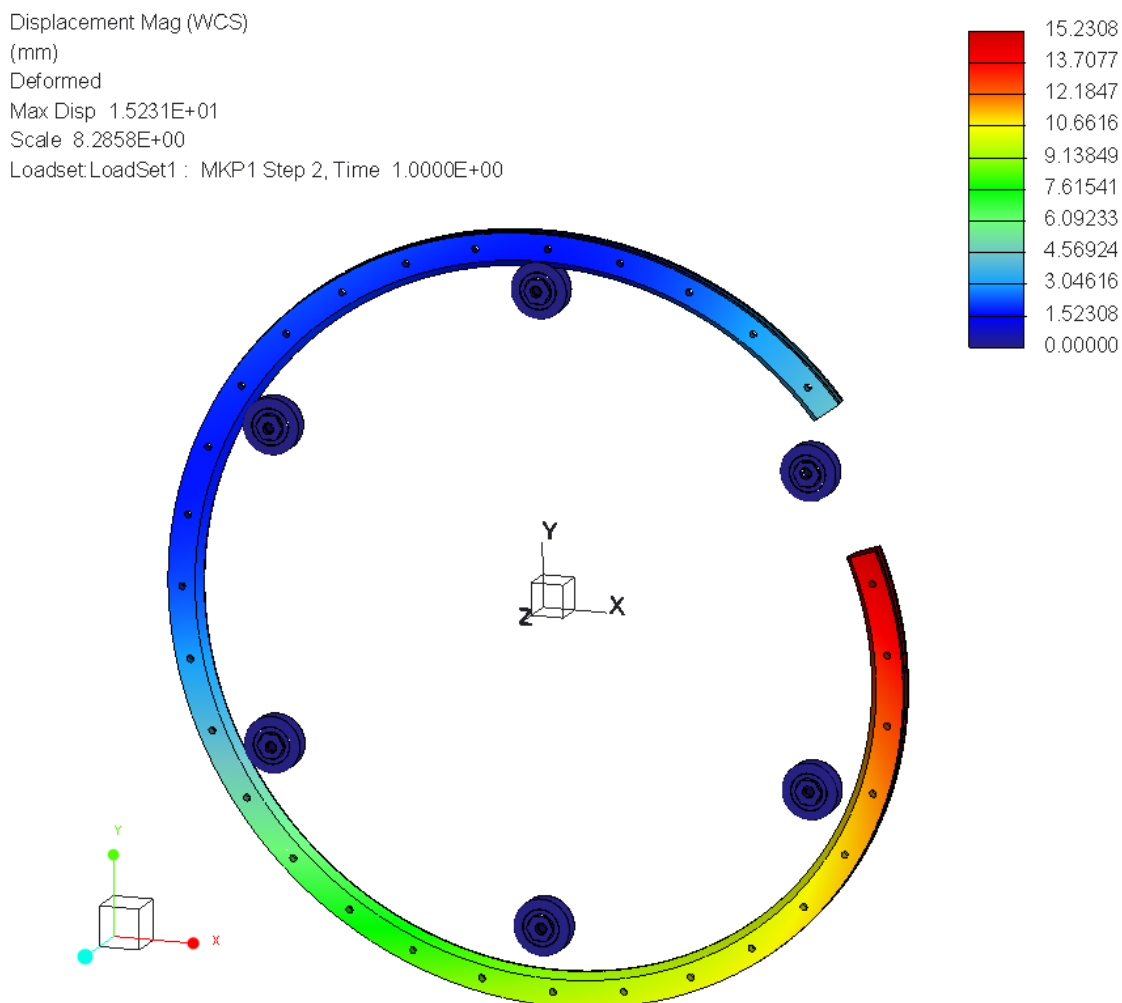
byla zadána okrajová podmínka zabraňující posuvům ve všech osách. Zatížení i vazby pro standardní prstenec znázorňuje obrázek 28.



Obrázek 28: Zatížení a uložení standardního prstence

6.7.2 Analýza standardního prstence

Po vnějším obvodu prstence je standardně vyráběno ozubení a na vnitřní straně se nacházejí vodící kladky. Aby ozubení mohlo plnit funkci pro přenos energie, nesmí docházet k příliš velké deformaci. Analýza byla provedena v nepříznivém okamžiku, kdy vyříznutý segment přechází přes jednu z horních kladek. Dochází tak k největšímu ohybovému namáhání a prstenec je zavěšen pouze na dvou kladkách. Obrázek 29 znázorňuje deformaci zvoleného uložení, zvýrazněnou pro lepší zobrazení. Výsledky potvrdily, že nedochází ke kontaktu mezi spodními kladkami a prstencem. Deformace dosahuje maximální hodnoty 15,2 mm, což je zcela nepřijatelné pro spolehlivý pohon i vedení.



Obrázek 29: Deformace standardního prstence

6.7.3 Analýza upraveného prstence

Předchozí analýza dokázala, že standardní uložení firmy HepcoMotion je pro tuto aplikaci nedostatečné. Proto bylo ozubení zúženo a byly vytvořeny drážky pro vnější kladky, umístěné vždy naproti stávajícím vnitřním kladkám. Zatěžování rámu je identické jako u předchozí analýzy. Byly pouze přidány kontakty mezi vnějšími kladkami a prstencem. Samotné kladky se opět berou jako dokonale tuhé se stejným charakterem uložení. Poloha prstence byla nastavena pro nepříznivý případ, kdy se otevřený úsek nachází u nejspodnější kladky. Zde působí stejným směrem odstředivá i gravitační síla držáku a nejvíce tak namáhá prstenec na ohyb od nejbližší kladky. Úprava uložení snížila deformaci prstence na 0,26 mm, viz obrázek 30. Vzhledem k průměru 1280 mm lze považovat tuto hodnotu za dostatečnou. Z analýzy také vychází ideální poloha umístění pohonů. Ty jsou aplikovány do horní části zařízení, kde proti sobě působí odstředivá a gravitační síla. Konečná podoba externích kladek a prstence, závisí na dohodě s firmou HepcoMotion, která bude provádět všechny

úpravy, a na jejich doporučení. Zejména konce prstence budou upraveny o zkosení usnadňující navádění do kladek.

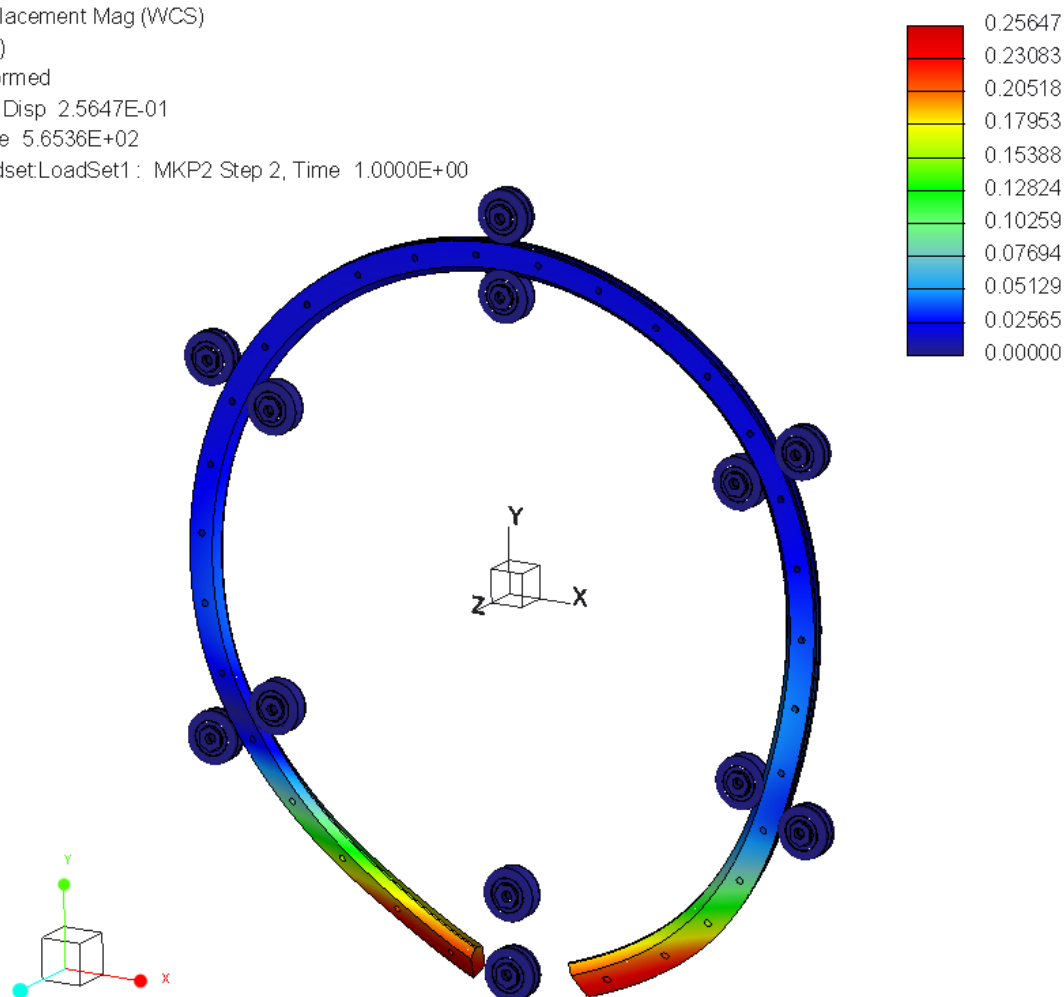
Displacement Mag (WCS)
(mm)

Deformed

Max Disp 2.5647E-01

Scale 5.6536E+02

Loadset:LoadSet1 : MKP2 Step 2, Time 1.0000E+00



Obrázek 30: Deformace upraveného prstence

6.8 Výpočet životnosti uložení prstence

Životnost uložení se kalkuluje podle vzorců a hodnot společnosti HepcoMotion a vychází z počtu a typu použitých kladek. Navrhnuté uložení patří mezi nestandardní a proto je nutné brát výsledky kalkulace jako přibližné. Vnější kladky jsou upraveny a svůj vliv má i rozříznutí prstence. Vnitřní kladky se lubrikují dodávaným mazacím systémem, ale vnější pouze plastickým mazivem. V případě použití řemenového pohonu nebudou mazány vůbec. Z těchto důvodů bude aplikován doporučený výpočet pouze na soustavu vnitřních kladek s uvažováním náhradního uzavřeného prstence. Síly od naváděcího ústrojí byly zanedbány. Rovnice /3/ udává přibližnou představu o životnosti prstence a jeho uložení. Při předpokládané produkci 50 000 rámců za rok se životnost přes devět let jeví jako dostatečná.

$$L_F = \frac{L_A}{L_{A \max}} + \frac{L_R}{L_{R \max}} + \frac{M}{M_{\max}} \leq 1$$

L_A síla v axiálním směru

L_R síla v radiálním směru

M moment k rovině prstence

/1/

$L_{A \max}$... maximální dovolená síla v axiálním směru

$L_{R \max}$... síla v radiálním směru

M_{\max} ... moment k rovině prstence

$$L_F = \frac{0}{35000} + \frac{1244}{30000} + \frac{296}{8471} = 0,076$$

$$S_L = \frac{B_L}{(0,04 + 0,96 \cdot L_F)^3} = \frac{300}{(0,04 + 0,96 \cdot 0,076)^3} = 205978 \text{ [km]}$$

/2/

S_L životnost uložení

B_L základní životnost

$$y_r = \frac{S_L}{\pi \cdot c \cdot n \cdot x} = \frac{205978000}{\pi \cdot 1,16 \cdot 30 \cdot 4} = 471012 \text{ [ks]}$$

y_r počet ovínutých rámců

/3/

c charakteristický průměr prstence

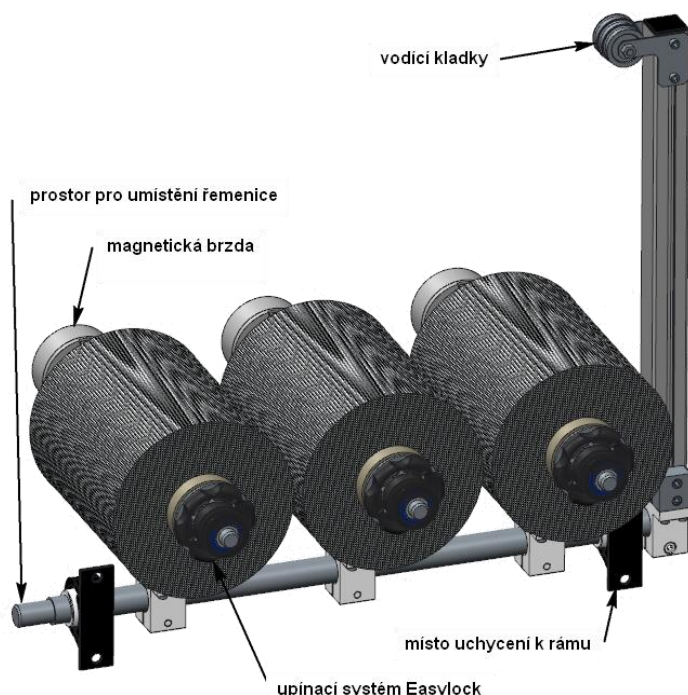
n počet otáček pro jeden ovin

x počet vrstev ovínu

6.9 Konstrukce podélné soustavy

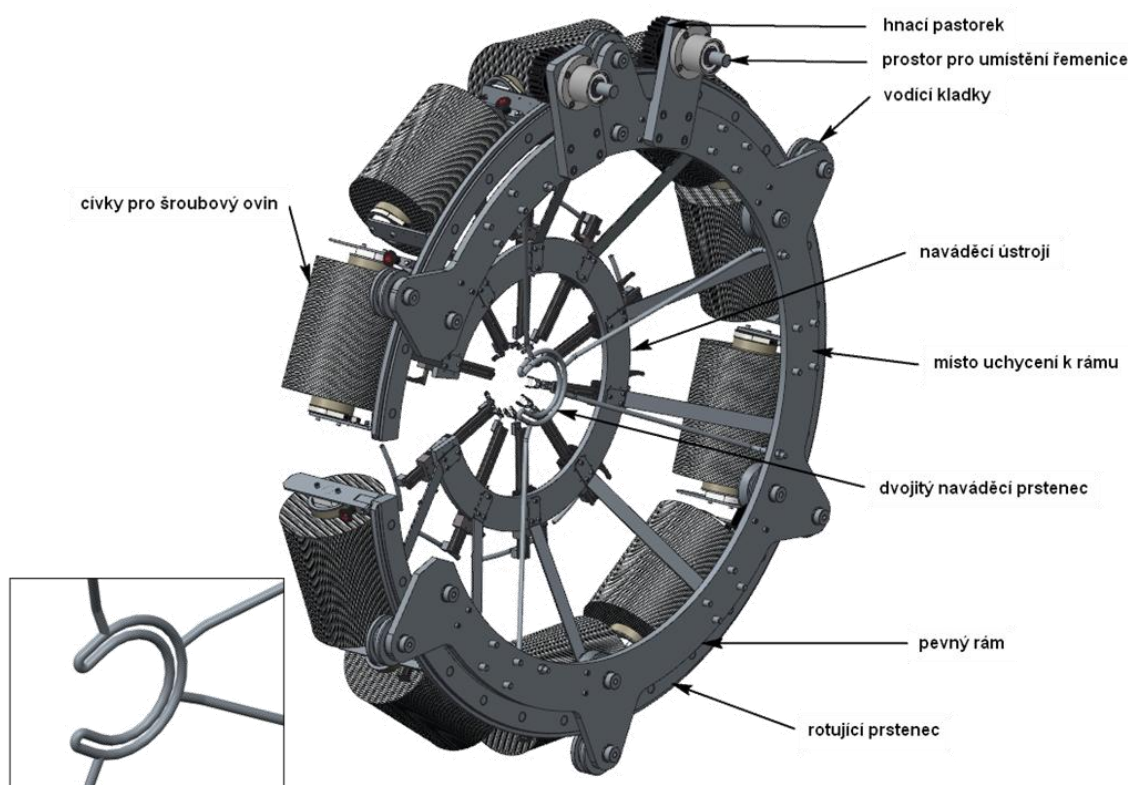
Podélné ústrojí se skládá z šesti cívek. Vždy tři pásy tvoří jednu soustavu (obrázek 31) a přivádí se ze dvou stran k ovíjenému jádru. Aby nedocházelo v rozích ke zkracování dráhy, vznikla myšlenka rotace podélných cívek. Otáčení cívek o celou otáčku by vyžadovalo podobné řešení jako u soustavy pro šroubový ovin. Cívky by musely být umístěny do pracovního prostoru a zbytečně by snižovaly univerzálnost stroje. Proto se přistoupilo k umístění cívek mimo pracovní stroj a rotace cívek byla omezena na maximálně 270°. Soustava s třemi cívkami provede v místě zaoblení rámu půlotáčku v opačném směru než soustava druhá. Aby byl tento pohyb umožněn, musí být na zařízení umístěn dvojité naváděcí prstenec. Navíc se vlákna z cívek musí vyhnout

ovíjenému jádru, a proto musí být odkloněna pomocí vodících kladek. Ty jsou u každé soustavy umístěné na různém poloměru, tak aby nedošlo k vzájemné kolizi soustav při překmitu.



Obrázek 31: Soustava cívek pro podélný ovin

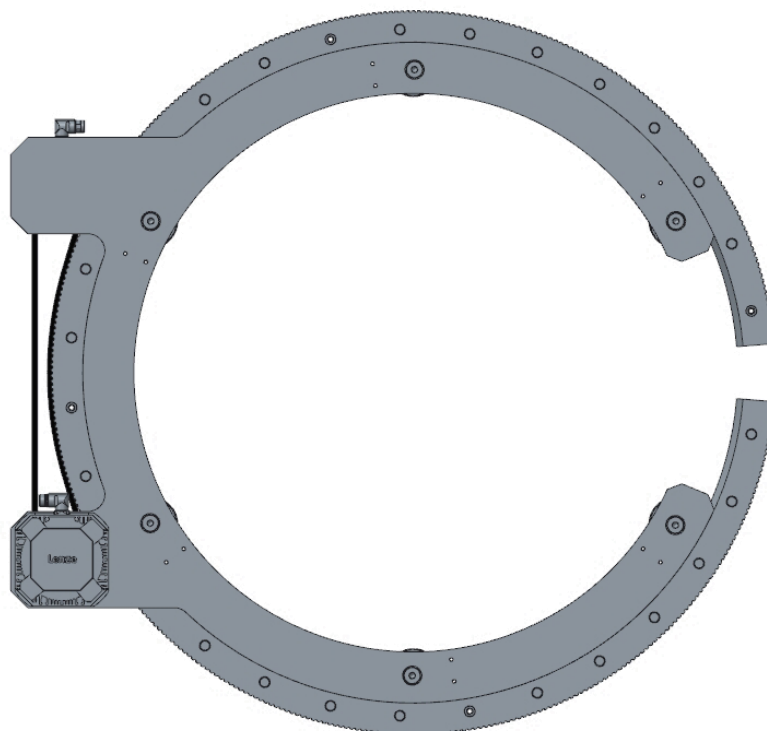
Držáky cívek jsou řešeny letmo a využívají upínací systém firmy Joachim Uhing KG GmbH & Co., tzv. Easylock. Ten umožňuje spolehlivé uchycení cívek a jejich rychlou výměnu. Brzdění cívek obstarává hysterezní magnetická brzda Mobac HB-140M-2 DS, která dovoluje libovolně měnit brzdicí moment od 0,01 do 1,2 Nm. Díky programové říditelnosti brzdy lze nastavit tah v pramenci na konstantní hodnotu. Držáky cívek jsou uchyceny svěrnými spoji na společnou hřídel, která se pohání přes ozubený řemen servomotorem. Na hřídeli se dále nachází naváděcí ústrojí, které stabilizuje pramence vedle sebe. Ústrojí je tvořeno třemi vodícími kladkami, jejichž rotace je vzájemně nezávislá a osazení na kladkách brání sklouzávání pramenců. Každá z kladek má odlišný průměr, aby nedocházelo ke kolizím při navádění. Dvojité naváděcí prstenec (obrázek 32), umístěný na jednom z pevných rámců, je vyroben z kruhového drátu a představuje pasivní naváděcí ústrojí. Jeho vzdálenost od místa ovíjení lze seřídit pomocí matic. Při překmitu cívek na druhou stranu se počítá s určitým shrnutím materiálu. Tento jev lze eliminovat dočasným snížením tahu v pramenci pomocí magnetické brzdy.



Obrázek 32: Soustava pro šroubový ovin s detailem dvojitého naváděcího prstence

6.10 Volba pohonů

Volba pohonu prstence je silně ovlivněna jeho rozříznutím. Uzavírání prstence představuje mezioperaci navíc a odtud pramení snaha se této činnosti vyhnout. U dělených prstenců se běžně využívají třecí převody v kombinaci s kruhovým řemenem. Toto řešení používají například balící stroje firmy Shanghai Jinglin Packaging Machinery Co., Ltd. viz obrázek 7. Pro potřebu přesné tvorby ovinu je ale nutné použití spolehlivého druhu pohonu, bez nebezpečí prokluzu. Z těchto důvodů byla vypracována varianta s ozubeným řemenovým pohonem, jak znázorňuje obrázek 33. Konstruována byla v době nezesíleného vedení prstence. Ozubené řemenové převody obecně poskytují spolehlivý přenos energie a zajišťují tichý chod. Problém spočívá v malé rozteči vyráběných řemenů. Pro šířku prstence 25 mm se vyrábějí modely s roztečí přibližně 5 mm. Při velikosti výřezu prstence 100 mm dojde ke zkrácení dráhy řemene o 1 mm. Po konzultaci se zaměstnanci z firmy Tyma CZ, s.r.o., zabývající se řemenovými převody, bylo od tohoto řešení opuštěno z důvodu vysokého rizika přeskokování řemene.



Obrázek 33: Varianta pohonu pomocí ozubeného řemene

Finální výběr pohonu využil možností evolventního ozubení, které se standardně vyrábí na prstencích firmy HepcoMotion. Každý prstenec bude poháněn dvojicí pastorků, na které se přenáší výkon elektromotoru. Většinu otáčky budou v záběru oba dva pastorky, při přejezdu přes výřez jeden. Tento druh pohonu je náročnější z důvodu synchronizace pohybu pastorků, jelikož při nepřesném sladění může docházet k rázům. Určitou tlumící funkci pak bude vykonávat řemenový převod, jimž jsou pastorky poháněny. Umístění pastorků pak vychází z deformačních analýz prstence do horní části zařízení, viz kapitola 6.7.3. Obdobné řešení využívá u svých strojů na ovin toroidních cívek firma Mega Bobinadeir. Podélná soustava bude poháněna dvojicí servomotorů přes řemenový převod.

Volba servopohonů na podélný i šroubový ovin vychází z možnosti přesného řízení všech soustav, což je důležité zejména pro testování ve fázi prototypu. Teprve budoucí praktické testy stanoví přesné požadavky na zařízení. Značné zlevnění pohonů lze spatřit hlavně ve sdružení pohonů. Obě soustavy totiž vykonávají obdobný pohyb, pouze s opačným smyslem. Například aplikací kuželového soukolí lze pohánět každou ze soustav pouze jedním motorem. Rotační soustavu je navíc možné v budoucnu pohánět klasickým asynchronním elektromotorem a polohu prstence zajišťovat pomocí senzorů.

6.10.1 Pohon rotujících prstenců

Každý rotující prstenec je poháněný dvojicí pastorků, které jsou spojeny ozubeným řemenem. Výpočet uvažuje nepříznivou situaci, kdy zabírá pouze jeden z pastorků. Sílu proti pohybu klade tah v pramencích i valivý odpor v kladkách. Hodnota tahu ve vláknech není doposud stanovena a bude určena z budoucích testů. Vliv tahu v pramencích i odpory v kladkách však mají malý vliv. Proto byl zvolen zátěžový moment 5 Nm, který se značnou rezervou tyto odpory pojme. Vstupní veličiny udává tabulka 4. Zrychlování a zpomalování během ovíjení je obtížné stanovit. Aby byl pohon dostatečně dimenzován, nevychází výpočet z ekvivalentního momentu, ale pouze z rozběhového momentu.

Tabulka 4: Vstupní veličiny pro výpočet rotačního pohonu

Veličina	Popis	Hodnota
ω_p	úhlová rychlost prstence	π [rad/s]
i_1	převodový poměr mezi prstencem a pastorkem	13,25 [-]
t_1	doba rozběhu	2 [s]
J_p	moment setrvačnosti prstence (včetně cívek a připojených součástí)	49,5 [kg·m ²]
M_{z1}	zatěžující moment	5 [Nm]

$$M_{r1} = M_{a1} + M_{z1} = J_p \cdot \varepsilon_p + M_{z1} = J_p \cdot \frac{\omega_p}{t_1} + M_{z1} = 49,5 \cdot \frac{\pi}{2} + 5$$

$$= 83 \text{ [Nm]}$$

$$M_{m1} = \frac{M_{r1}}{i_1 \cdot i_2} = \frac{83}{13,25 \cdot 1} = 6,3 \text{ [Nm]}$$

M_r rozběhový moment /4/

M_m moment na motoru

M_a akcelerační moment

ε_p úhlové zrychlení rotační soustavy

i_2 převodový poměr řemenového převodu

$$P_1 = \frac{M_{r1} \cdot \omega_p}{\eta_o \cdot \eta_{\text{ř}}} = \frac{83 \cdot \pi}{0,98 \cdot 0,96} = 277 \text{ [W]}$$

P výkon na motoru /5/

η_o účinnost ozubeného převodu

$\eta_{\text{ř}}$ účinnost řemenového převodu

Na základě vypočtených údajů byl s ohledem na budoucí variabilitu zvolen servomotor s planetovou převodovkou Lenze GPA01-1S GCN 006IN41 s výkonem 0,64 kW. Momenty setrvačnosti motoru, převodovky, hřídele i řemenic jsou i po přepočtení na společnou hřídel o několik řádů nižší, a proto je můžeme zanedbat.

6.10.2 Pohon podélné soustavy

U podélného soustavy pohání motor soustavu tří cívek uložených na hřídeli. Předpokládaná doba překmitu o půl otáčky byla stanovena na jednu vteřinu. Tah v pramencích má na výkon motoru minimální vliv, a proto byl zanedbán. Nejvyšší zatížení soustavy je při vychýlení o 90°, kdy působí gravitační síla na největším rameni a za této situace byl stanoven zatěžovací moment. Na základě výsledků byl zvolen motor Lenze GST03-2S VBR 06CN41 s výkonem 0,25 kW.

$$M_{r2} = M_{a2} + M_{z2} = J_s \cdot \varepsilon_s + M_{z2} = J_s \cdot \frac{\omega_s}{t_2} + m \cdot g \cdot r$$

$$= 1,39 \cdot \frac{\pi}{2} + 41,4 \cdot 9,81 \cdot 0,12 = 51 \text{ [Nm]}$$

$$M_{m2} = \frac{M_{r2}}{i_3} = \frac{51}{2} = 26 \text{ [Nm]}$$

ε_s úhlové zrychlení podélné soustavy

/6/

J_s moment setrvačnosti podélné soustavy

i_3 převodový poměr řemenového převodu

m hmotnost rotující hmoty

g tíhové zrychlení

r poloměr těžiště od osy rotace

$$P_2 = \frac{M_{r2} \cdot \omega_s}{\eta_f} = \frac{51 \cdot \pi}{0,96} = 167 \text{ [W]}$$

/7/

6.10.3 Kontrola ozubeného převodu

Kontrola ozubení vychází ze situace, kdy je přenášen veškerý výkon elektromotoru při 30 otáčkách za minutu. Kontrola byla provedena výpočtem v aplikaci Autodesk Inventor Professional 2013 dle normy ISO 6336:1996. Obě kola jsou z povrchově kalené oceli 12 051. Rozříznutí prstence bylo zohledněno součinitelem K_A , uvažujícím velkou nerovnoměrnost zatěžování, dále třídou přesnosti ozubení 9 a nízkým součinitelem maziva. Výpočet uvažoval stálý záběr pouze jednoho pastorku, ale při reálném pohybu většinu otáčky zabírají dva pastorky. I při takto krajních

podmínkách ozubení vyhovělo a zjistilo se, že dokáže přenést výkon až 1,3 kW. Dále bylo zjištěno, že při přenosu výkonu 277 W viz kapitola 6.10.1, mohou být zuby prstence pouze zušlechťené.

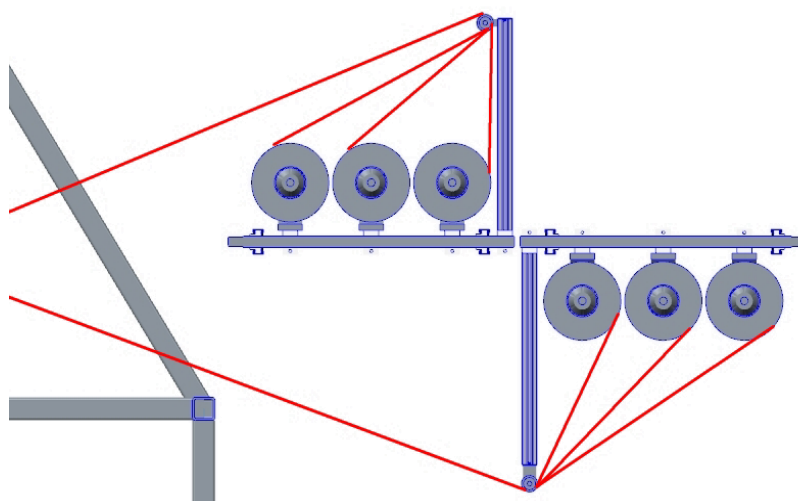
Výpočty stanovily limitní hodnoty ozubení pro různé zatěžování i použité materiály. Ozubení vyhovuje požadovaným nárokům a nepředstavuje omezující faktor pro navrhované zařízení. Výsledky výpočtu při maximálním výkonu motoru 0,64 kW uvádí příloha č. 3.

6.10.4 Kontrola řemenových převodů

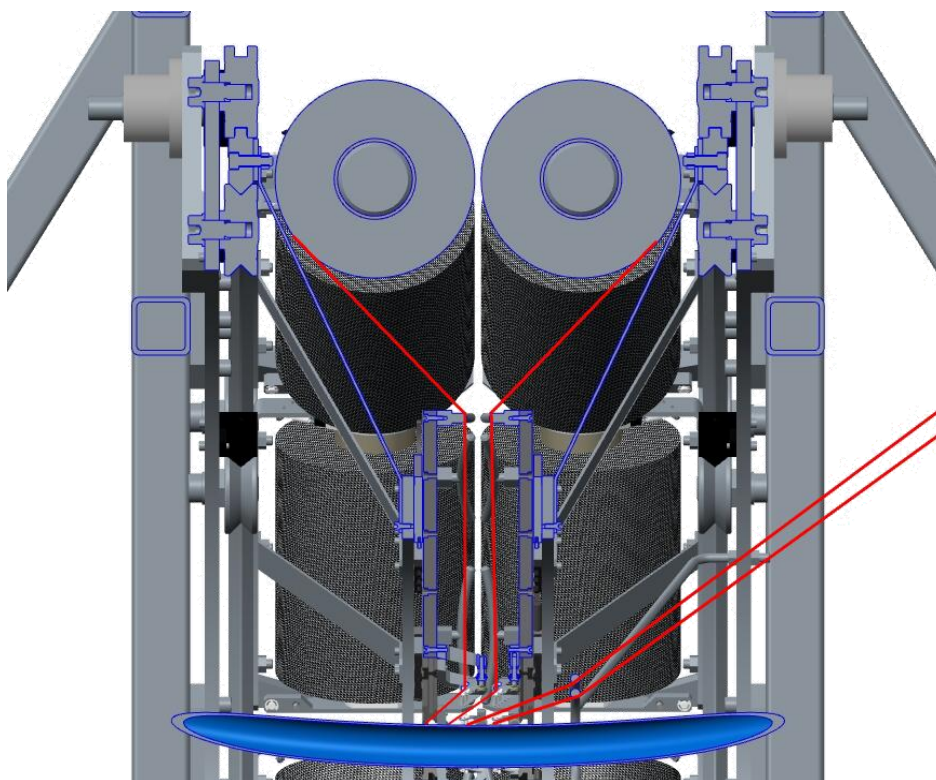
Výběr řemenů byl proveden pomocí webového generátoru firmy Gates. Od stejné společnosti byly vybrány řemeny, řemenice i systém jejich uchycení k hřídelům. Dimenzování řemenů bylo provedeno na maximální výkony použitých motorů a odpovídající otáčky. Pro rotační soustavu byl vybrán řemen 8M-30 řady HTD. Podélná soustava využívá řemene 8MGT3-30. Webový generátor umožňuje výpočet pouze soustavy s dvěma řemenicemi. Z těchto důvodů byla provedena kontrola i pomocí aplikace Autodesk Inventor Professional 2013. Vygenerované zprávy od firmy Gates se vstupními údaji udává příloha č. 4 a příloha č. 5. Finální volbu řemenů bude nutné po konkrétním návrhu svařovaných rámů konzultovat se specializovanou firmou. Uchycení řemenic k hřídelům se uvažuje pomocí per či silových spojů.

6.11 Průběh pramenců naváděcím ústrojím

Systém navádění pramenců do místa ovinu je podstatnou součástí navrhovaného zařízení. Konkrétní chování pramenců při průchodu přes vodící členy bude nutno stanovit na funkčním modelu. Obrázek 35 znázorňuje prameny (červenou barvou) při cestě z cívek kovíjenému jádru. Průchod pramenců přes podélnou soustavu pak zobrazuje obrázek 34.



Obrázek 34: Průchod pramenců přes podélnou soustavu

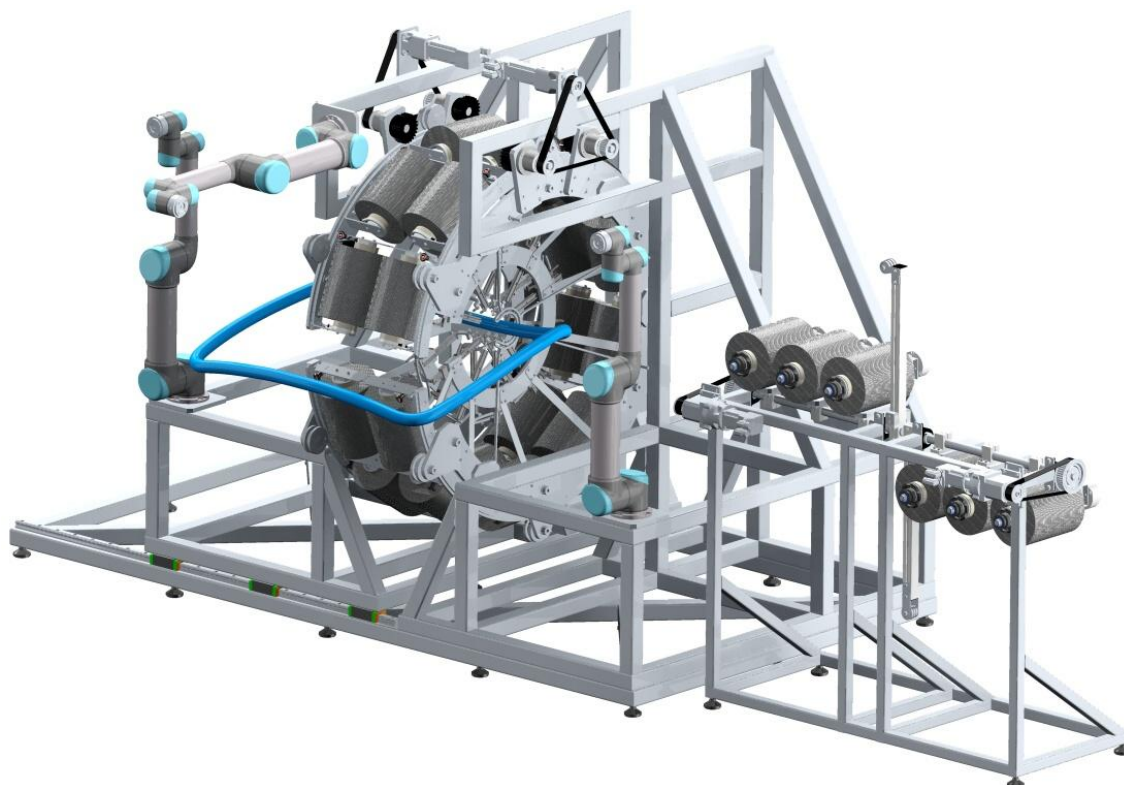


Obrázek 35: Průchod pramenců přes naváděcí ústrojí

7 Vizualizace budoucího zařízení

Zhotovená vizualizace naznačuje možné další směřování v konstrukci stroje. Ovíjecí zařízení bylo doplněno o svařované rámy, řemenové pohony a soustavu tří manipulačních robotů firmy Universal Robots. Svařovaný rám s jednou soustavou cívek pro ovin pod úhlem lze posouvat po lineárních vedení firmy Hiwin. Díky tomu je zajištěn pohodlný přístup do středu stroje pro potřeby údržby. Další fází návrhu by byla detailní konstrukce svařovaných ráků, elektrických komponent, krytování, odsávání a dalších součástí. Vizualizaci budoucího zařízení znázorňuje obrázek 36.

Odsunutí jednoho z ráků při údržbě vykresluje příloha č. 6. Pro představu o velikosti zařízení byla do této vizualizace umístěna figurína dospělého muže.



Obrázek 36: Vizualizace budoucího zařízení

8 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo ověření možnosti použití standardních cívek s uhlíkovými vlákny pro tvorbu ovinu dle požadavků zadavatele. Rozměry cívek vycházejí z historického použití v leteckém průmyslu a kosmonautice. Stanovení maximálního využitelného prostoru bylo zjištěno pomocí několika prostorových analýz, při nichž nebylo určeno pouze volné místo pro pohyb cívek, ale byly zjištěny i parametry podstatně ovlivňující kvalitu ovinu. Odhalilo se, že hlavní vliv na nově vytvořenou vrstvu má odklon tečny křivky ovíjeného jádra od osy rotujících cívek. Proto byl návrh zaměřen na minimální využití pracovního prostoru. Ze stejného důvodu se umístily podélné cívky externě mimo pracovní prostor. Navrhnutou konstrukcí bylo dosaženo odklonu na hodnotu přibližně 12° , což je méně než polovina z maximální hodnoty, kterou požadoval zadavatel. Dalšího možného snižování odklonu lze dosáhnout použitím menších cívek. Velikost průměru cívek byla zvolena na minimální rozměr, ve kterém se vyrábějí cívky s pramenci o 24 i 48 tisíc vláken.

Při konstrukci zařízení bylo vytvořeno několik variant orientace cívek, umístění prstenců vůči cívkám, držáků cívek i naváděcích ústrojí. Volba výrobních technologií byla uzpůsobena budoucí výrobě prototypu. Ze stejného důvodu pramenila během konstrukce snaha o maximální použití vyráběných dílů. Dále byla provedena kontrola vybraných konstrukčních uzlů zařízení. Rotující prstenec a jeho uložení patřil mezi nejkritičtější díly. Z tohoto důvodu byly provedeny deformační analýzy prstence metodou konečných prvků. V závěru práce byla vyhotovena vizualizace, znázorňující návrh budoucího zařízení včetně svařovaných rámu. Součástí této studie bylo i rozmístění robotů pro manipulaci s ovíjeným jádrem.

Návrh zařízení dokázal, že ovin dle požadavků zadavatele, lze vytvořit s použitím standardních cívek. Díky tomu se nemusí cívky přesoukávat na menší rozměr, čímž se sníží namáhání vláken i čas na celkovou operaci ovíjení uzavřeného rámu. Zároveň se díky větší zásobě materiálu prodlouží interval výměny cívek. Nově navržené zařízení využívá několik nestandardních řešení. Proto bude nutné pro budoucí realizaci provést řadu praktických testů, které ověří předpoklady uvažované v této práci.

Použitá literatura

1. EHRENSTEIN, W. G. *Polymerní kompozitní materiály*. Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
2. Wikipedia, the free encyclopedia. *Boeing 787 Dreamliner* [online]. [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_787_Dreamliner
3. A&P Technology. *Composite Bridge Arches* [online]. [cit. 2013-03-12]. Dostupné z: <http://www.braider.com/Case-Studies/Composite-Bridge-Arches.aspx>
4. CompositesWorld. *The markets: Civil infrastructure (2011)* [online]. 17. 1. 2009 [cit. 2013-03-12]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/the-markets-civil-infrastructure-2010>
5. EuPC - European Plastics Converters. *Automotive* [online]. [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: <http://www.plasticsconverters.eu/organisation/division/automotive>
6. HEEPS, G. a J. O'BRIEN. Carbon footprint. *Crash Test Technology International*. 2012, s. 36-40 [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.lambolab.org/wp-content/uploads/06media/press/2012-09-Crash-Test-Technology-International.pdf>
7. BMW i Concept. *BMW i. Born Electric*. [online]. [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: http://www.bmw-i-usa.com/en_us/concept/
8. VEIT, D. *Automated preforming- Our vision for composite production* [online]. [cit. 2013-03-12]. Dostupné z: www.ita.rwth-aachen.de/3-f-und-d/ttna-rev7.pptx
9. BMW Group PressClub Česká republika. *BMW Group a Boeing spolupracují na recyklaci uhlíkových vláken*. [online]. 12. 12. 2012 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: https://www.press.bmwgroup.com/pressclub/p/cz/pressDetail.html?title=bmw-group-a-boeing-spolupracuj%C3%AD-na-recyklaci-uhl%C3%ADkov%C3%BDch-vl%C3%A1ken&outputChannelId=46&id=T0135333CS&left_menu_item=node__2201#
10. Technický týdeník. *Uhlíkové vlákno jako produkt recyklace* [online]. 1. 1. 2006 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/uhlikove-vlakno-jako-produkt-recyklace_16717.html
11. WILDRICK, B. *Use of braiding technology to improve anchorage systems with non-metallic cables*. Lenigh University: 1994. Diplomová práce. Lenigh University [cit. 2013-02-25]. Dostupné z: <http://preserve.lehigh.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1321&context=etd>
12. Composites. *HERZOG Braiding Machines* [online]. [cit. 2013-04-08]. Dostupné z: http://www.herzog-online.com/_rubric/index.php?rubric=Products+Composites+EN
13. Textile Machines. *ITA Aachen - Institut für Textiltechnik - RWTH Aachen* [online]. [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: http://www.ita.rwth-aachen.de/andere_sprachen/englisch/3-01-textilemachines.htm
14. RUFF GmbH. *RWE Evolution / Advanced* [online]. [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: <http://www.ruff-inc.com/>
15. Shanghai Jinglin Packaging Machinery. *Wrapping Machine, Coil Wrapping Machine, Packaging Machine* [online]. [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: <http://www.shpackingmachines.com/>
16. BECKWITH, S. Filament winding vs. fiber placement manufacturing technologies. *SAMPE Journal*. 2008, s. 54-55 [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: <http://www.sampe.org/news/TechTidbitMarApr08.pdf>
17. MAW20 FB4. *Filament Winding Machines from MIKROSAM* [online]. [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.mikrosam.com/filament/maw20fb4/maw20fb4.html>

18. TORRESFIBERLAYUP. *MTorres* [online]. [cit. 2013-04-06]. Dostupné z: <http://www.mtorres.es/en/aeronautics/products/carbon-fiber/torresfiberlayup>
19. *Katalogy firmy Zoltek.*
20. *Katalogy firmy Aksaca.*
21. *Katalogy firmy Grafil.*
22. *Katalogy firmy Hexcel.*
23. *Katalogy firmy SGL Group.*
24. *Katalogy firmy Tenax.*
25. *Katalogy firmy Toray.*
26. VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. Praha: SNTL, 1983.
27. KŘÍŽ, R. *Strojírenská příručka 6. svazek*. Praha: Scientia, 1995. ISBN 80-85827-88-3.
28. KŘÍŽ, R. *Strojírenská příručka 3. svazek*. Praha: Scientia, 1993. ISBN 80-85827-23-9.
29. LEINVEBER, J. *Technické kreslení a základy deskriptivní geometrie*. 3. vyd. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-7183-162-X.
30. ŠMATELKA, S. *Zařízení pro ovíjení prstencových rotačních předmětů obalovým materiálem* [online]. MPT: B 65 b 25/00. Československá socialistická republika. Patent, 144713. 1968-10-07 [cit. 2013-01-14]. Dostupné z: <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/144/144713.pdf>
31. AKTIENGESELLSCHAFT, S. A. H. *Zařízení na ovíjení kruhových těles* [online]. 70406. Rakousko. Patent, 2240. 1915-11-10 [cit. 2013-02-07]. Dostupné z: <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/2/2240.pdf>
32. ANDERSON, A. et al. *Filament winding apparatus and methods of winding filament* [online]. U.S.A. Patent, US 7124792 B2. 2006-10-24 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/7124797.pdf>

Seznam příloh

1. Přehled vlastností vláken
2. Přehled cívek s pramenci z uhlíkových vláken
3. Výpis generátoru ozubených kol z aplikace Inventor
4. Kontrola řemenového převodu pro rotační soustavu
5. Kontrola řemenového převodu pro podélnou soustavu
6. Vizualizace budoucího zařízení při údržbě
7. Výkresová dokumentace

Příloha č. 1 Přehled vlastností vláken [1]

Vlákno	Hustota ρ [g·cm ⁻³]	Mez pevnosti v tahu σ_{pt} [MPa]	Modul pružnosti v tahu $E_{ }$ [GPa]	Modul pružnosti v tahu E_{\perp} [GPa]	Tažnost δ [%]	Teplotní koeficient délkové roztlačnosti $\alpha_{ }$ [10·6·K ⁻¹]	Teplotní koeficient délkové roztlačnosti α_{\perp} [10·6·K ⁻¹]	Tepelná vodivost λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Relativní permitivita ϵ_r [-]	Rezistivita ρ_{el} [Ω·cm]	Nasákavost* [%]
Sklo											
E-sklo	2,6	2400	73	73	3	5	5	1	6,1 až 6,7	10 ¹⁴ až 10 ¹⁵	≤0,1
R-sklo	2,53	3500	86	86	4,1	4	4	1	6 až 6,1		
Uhlíkové vlákno											
HM1	1,96	1750	500	5,7	0,35	-1,5	15	-	Vodivé**	10 ⁻³ až 10 ⁻⁴ **	≤0,1
HM2	1,8	3000	300	-	1	-1,2	12	15			
HT	1,78	3600	240	15	1,5	-1	10	17			
HST	1,75	5000	240	-	2,1	-1	10	17			
IM	1,77	4700	295	-	1,6	-1,2	12	-			
Aramid											
HM	1,45	3000	130	5,4	2,1	-4	52	0,04 až 0,05	2,5 až 4,1	10 ⁵	≈3,5
LM	1,44	2800	65	-	4,3	-2	40	-	-		≈7

* Nasákavost při 20°C a 65% relativní vlhkosti

** Pro všechna uhlíková vlákna

‖ hodnoty ve směru vláken

⊥ hodnoty kolmo na směr vláken

Příloha č. 2 Přehled cívek s pramenci z uhlíkových vláken [20, 21, 22, 23, 24, 25, 19]

Společnost	Označení	Počet vláken [tisíce]	Tex [g/km]	Hustota [g/cm ³]	Pevnost [GPa]	E [GPa]	Výška jádra cívky [mm]	Výška návinnu [mm]	Průměr jádra cívky [mm]		Vnější průměr cívky [mm]	Hmotnost cívky [kg]	Délka návinnu [m]	Země výroby
									vnitřní	vnější				
AKSACA	A42	24	1600	1,78	4,2	240								Turecko
	A49	24	1600	1,79	4,9	240								
GRAFIL	34-600WD	48	3200	1,8	4,5	234	298		75,55	82	142	2,25	700	USA
											183	4,5	1400	
	34-700	24	1600	1,8	4,83	234	298		75,55	82	140	2,25	1400	
											178	4,5	2800	
	34-700WD	24	1600	1,8	4,83	234	298		75,55	82	140	2,25	1400	
178											4,5	2800		
37-800WD	30	1675	1,8	5,52	255	298		75,55	82	193	6,8	4060		
HEXCEL	AS3C	24		1,79	4,261	231	203,2							
SGL GROUP	SIGRAFIL C30	50	3300	1,8	4	240	279		76			8,7	2500	Německo
	SIGRAFIL C40	24	1600	1,82	4,8	240	279		76			4	2500	
	SIGRAFIL C50	24	1600	1,82	5	265								
TENAX	HTS40 F13	24	1600	1,77	4,3	240	290	254	77	83,6	145	2	1250	Německo
											180	4	2500	
											205	6	3750	
											225	8	5000	
	STS40 F13	24	1600	1,77	4,0	240	280	254	77	83,6	145	2	1250	Japonsko
											180	4	2500	
											205	6	3750	
											225	8	5000	
							290	254			145	2	1250	Německo
											180	4	2500	
											205	6	3750	
											225	8	5000	
	STS40 F13	48	3200	1,77	4,0	250	280	254	77	83,6	205	6	1872	Japonsko
											225	8	2496	

Společnost	Označení	Počet vláken [tisíce]	Tex [g/km]	Hustota [g/cm ³]	Pevnost [GPa]	E [GPa]	Výška jádra cívky [mm]	Výška návinu [mm]	Průměr jádra cívky [mm]		Vnější průměr cívky [mm]	Hmotnost cívky [kg]	Délka návinu [m]	Země výroby
									vnitřní	vnější				
							290	254			245	10	3120	Německo
											205	6	1872	
											225	8	2496	
											245	10	3120	
	UTS50 F24	24	1600	1,79	5	245	280	254	77	83,6	180	4	2500	Japonsko
	IMS60 E13	24	830	1,8	5,7	290	280	254	77	83,6	145	2	2400	Japonsko
											180	4	4800	
	IMS65 E23	24	830	1,78	6	290	290	254	77	83,6	145	2	2400	Německo
											180	4	4800	
	UMS40 F22	24	800	1,79	4,6	395	280	254	77	83,6	145	2	2500	Japonsko
TORAY	T620S	24	1850	1,77	4,3	235	280	252	76,5	82,5	200	6		USA, Francie
	T700S	24	1650	1,8	4,9	230	280	252	76,5	82,5	200	6		
							280	252	76,5	78,9	220	8		
	T800S	24	1040	1,8	5,88	294	280	170	76,5	82,5	170	4		
ZOLTEK	Panex 35	50	3704	1,81	4,137	242	280	260	76		185	5,5	1500	USA, Mexiko, Maďarsko
							280	260	76		245	11	3000	

Příloha č. 3 Výpis generátoru ozubených kol z aplikace Inventor

Generátor komponent – čelní ozubená kola (Verze: 2013 SP2 (Build 170200200, 200))

20.5.2013

☒ Informace o projektu

☒ Scénář

Scénář návrhu - Vzdálenost os

Scénář jednotkového posunutí - Vlastní

Typ výpočtu zatížení - Výpočet krouticího momentu pro daný příkon a otáčky

Typ výpočtu pevnosti - Kontrolní výpočet

Metoda výpočtu pevnosti - ISO 6336:1996

☒ Společné parametry

Převodový poměr	i	13,2500 ul
Požadovaný převodový poměr	i_{in}	13,2500 ul
Modul	m	4,000 mm
Úhel sklonu	β	0,0000 deg
Úhel profilu	α	20,0000 deg
Vzdálenost os	a_w	684,000 mm
Roztečná vzdálenost os	a	684,000 mm
Celková jednotková korekce	Σx	0,0000 ul
Rozteč zubů	p	12,566 mm
Základní rozteč	p_{tb}	11,809 mm
Provozní úhel záběru	α_w	20,0000 deg
Součinitel trvání záběru	ε	1,7690 ul
Mezní úchylna rovnoběžnosti os	f_x	0,0340 mm
Mezní úchylna rovnoběžnosti os	f_y	0,0170 mm

☒ Kola

		Kolo 1	Kolo 2
Typ modelu		Komponenta	Komponenta
Počet zubů	z	24 ul	318 ul
Jednotkové posunutí	x	0,0000 ul	0,0000 ul
Průměr roztečné kružnice	d	96,000 mm	1272,000 mm
Průměr hlavové kružnice	d_a	104,000 mm	1280,000 mm
Průměr patní kružnice	d_f	86,000 mm	1262,000 mm
Průměr základní kružnice	d_b	90,210 mm	1195,289 mm
Pracovní roztečný průměr	d_w	96,000 mm	1272,000 mm
Šířka ozubení	b	27,000 mm	12,000 mm
Šířkový poměr	b_r	0,1250 ul	0,0094 ul
Výška hlavy zubu	a^*	1,0000 ul	1,0000 ul
Hlavová vůle	c^*	0,2500 ul	0,2500 ul
Zaoblení paty	r_f^*	0,3500 ul	0,3500 ul
Tloušťka zubu	s	6,283 mm	6,283 mm
Čelní tloušťka zubu	s_t	6,283 mm	6,283 mm
Tloušťka zubu na těživě	t_c	5,548 mm	5,548 mm
Výška hlavy zubu nad těživou	a_c	2,990 mm	2,990 mm
Rozměr přes zuby	W	30,866 mm	437,018 mm
Rozměr přes zuby	z_w	3,000 ul	36,000 ul
Rozměr přes válečky (kuličky)	M	105,903 mm	1282,174 mm

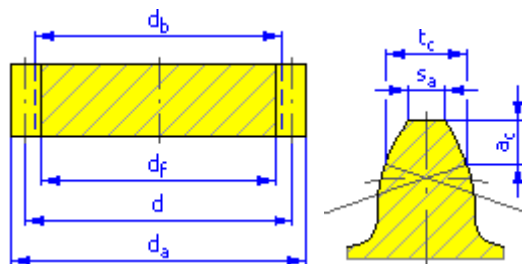
Průměr válečku (kuličky)	d_M	7,000 mm	7,000 mm
Mezní úchylka sklonu zubu	F_β	0,0340 mm	0,0410 mm
Mezní obvodové házení ozubení	F_r	0,0620 mm	0,1690 mm
Mezní úchylka čelní rozteče	f_{pt}	0,0260 mm	0,0390 mm
Mezní úchylka základní rozteče	f_{pb}	0,0240 mm	0,0370 mm
Náhradní počet zubů	z_v	24,000 ul	318,000 ul
Virtuální roztečný průměr	d_n	96,000 mm	1272,000 mm
Virtuální hlavový průměr	d_{an}	104,000 mm	1280,000 mm
Virtuální průměr základní kružnice	d_{bn}	90,210 mm	1195,289 mm
Jednotková korekce bez zúžení	x_z	0,3325 ul	-8,5397 ul
Jednotková korekce bez podříznutí	x_p	-0,3840 ul	-17,5798 ul
Jednotkové posunutí s dovol. podříznutím	x_d	-0,5540 ul	-17,7497 ul
Snížení hlavy zubu	k	0,0000 ul	0,0000 ul
Jednotková šířka hlavy zubu	s_a	0,7156 ul	0,8311 ul
Hlavový úhel profilu	α_a	29,8411 deg	20,9617 deg

☐ Zatížení

		Kolo 1	Kolo 2
Výkon	P	0,640 kW	0,627 kW
Otáčky	n	400,00 rpm	30,19 rpm
Krouticí moment	T	15,279 N m	198,396 N m
Účinnost	η	0,980 ul	
Radiální síla	F_r	115,855 N	
Obvodová síla	F_t	318,310 N	
Axiální síla	F_a	0,000 N	
Normální síla	F_n	338,738 N	
Obvodová rychlost	v	2,011 mps	
Rezonanční otáčky	n_{E1}	10439,244 rpm	

☐ Materiál

		Kolo 1	Kolo 2
		CSN 12051	CSN 12051
Mez pevnosti v tahu	S_u	640 MPa	640 MPa
Mez kluzu v tahu	S_y	390 MPa	390 MPa
Modul pružnosti v tahu	E	206000 MPa	206000 MPa
Poissonova konstanta	μ	0,300 ul	0,300 ul
Mez únavy v ohybu	σ_{Flim}	390,0 MPa	390,0 MPa
Mez únavy v dotyku	σ_{Hlim}	1140,0 MPa	1140,0 MPa
Tvrдость v jádře zubu	JHV	210 ul	210 ul
Tvrдость na boku zubu	VHV	600 ul	600 ul
Bázový počet zatěžovacích cyklů v ohybu	N_{Flim}	3000000 ul	3000000 ul
Bázový počet zatěžovacích cyklů v dotyku	N_{Hlim}	100000000 ul	100000000 ul
Exponent Wöhlerovy křivky pro ohyb	q_f	6,0 ul	6,0 ul
Exponent Wöhlerovy křivky pro dotyk	q_H	10,0 ul	10,0 ul
Zpracování materiálu	tvar	2 ul	2 ul



☐ Výpočet pevnosti

☐ Součinitelé přidavných zatížení

Součinitel vnějších dynamických sil	K_A	2,250 ul	
Součinitel vnitřních dynamických sil	K_{Hv}	1,180 ul	1,180 ul
Souč. nerovnoměrnosti zatížení po šířce	$K_{H\beta}$	1,596 ul	1,382 ul
Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů	$K_{H\alpha}$	1,345 ul	1,484 ul
Součinitel jednorázového přetížení	K_{AS}	1,000 ul	

☐ Součinitelé pro dotyk

Součinitel mechanických vlastností	Z_E	189,812 ul	
Součinitel tvaru spoluzabírajících zubů	Z_H	2,495 ul	
Součinitel délky dotyku	Z_E	0,862 ul	
Součinitel jednopárového záběru	Z_B	1,075 ul	1,000 ul
Součinitel životnosti	Z_N	1,000 ul	1,000 ul
Součinitel maziva	Z_L	0,900 ul	
Součinitel výchozí drsnosti zubů	Z_R	1,000 ul	
Součinitel obvodové rychlosti	Z_v	0,957 ul	
Součinitel sklonu zubu	Z_β	1,000 ul	
Součinitel velikosti	Z_x	1,000 ul	1,000 ul
Součinitel párování materiálu	Z_w	1,000 ul	

☐ Součinitelé pro ohyb

Součinitel tvaru zubu	Y_{Fa}	2,680 ul	2,105 ul
Součinitel koncentrace napětí	Y_{Sa}	1,598 ul	1,939 ul
Součinitel přidavného vrubu v patě zubu	Y_{Sag}	1,000 ul	1,000 ul
Součinitel sklonu zubu	Y_β	1,000 ul	
Součinitel délky dotyku	Y_E	0,674 ul	
Součinitel střídavého zatížení	Y_A	1,000 ul	1,000 ul
Součinitel technologie výroby	Y_T	1,000 ul	1,000 ul
Součinitel životnosti	Y_N	1,000 ul	1,000 ul
Součinitel vrubové citlivosti	Y_δ	1,125 ul	1,151 ul
Součinitel velikosti	Y_x	1,000 ul	1,000 ul
Součinitel drsnosti povrchu	Y_R	1,000 ul	

☐ Výsledky

Součinitel bezpečnosti v dotyku	S_H	1,719 ul	1,848 ul
Součinitel bezpečnosti v ohybu	S_F	7,016 ul	4,519 ul
Statická bezpečnost v dotyku	S_{Hst}	1,912 ul	2,055 ul
Statická bezpečnost v ohybu	S_{Fst}	15,591 ul	9,815 ul
Kontrolní výpočet		Kladný	

☐ Souhrn hlášení

22:54:41 Návrh: Kolo 1: Jednotkové posunutí (x) je menší než Jednotková korekce bez zúžení (x_z)

22:54:41 Návrh: Počty zubů jsou soudělné – dochází k relativně častému záběru stejných zubů

22:54:41 Výpočet: Výpočet skončil úspěšně!

Příloha č. 4 Kontrola řemenového převodu pro rotační soustavu



Návrh řemenového převodu - Detaily pohonu

Design Flex® Web by the Gates Corporation

Navrženo pro: Jakub Misak TU of Liberec Jachymovska 248 Liberec, XX 46010 Czech Republic jakub.misak@tul.cz 00420603943553 Telefon		Zajistuje: Design Flex® Web Gates Corporation	
Aplikace: Design #1			
VSTUP		Info. o pohonu	
Pomer otáček:	1.00	Otáčky za minutu:	400.0
Výkon motoru:	0.64	Prumer hrdele:	22 mm
Provozní faktor:	1.7		
Konstr. výkon:	1.09 kW	Kontrolovaná pouzdra:	Zádná
Stredová vzdálenost:	320 mm +/-10%	Kontrolované remeny:	PowerGrip GT3, PowerGrip HTD
ZVOLENÝ POHON		Typ remene: PowerGrip HTD - 8M	
Pomer otáček:	1.0	Díl c.:	856-8M-30
Rychlost hnaná:	400.0	Produkt c.:	9293-42650
Nominální výkon:	1.05 kW	Horní sírka:	--
Na hrídel	643 N	Hmotnost převodu:	159 g
		Obv. rychl. m/s:	1.3 m/s
		Otáčky za minutu:	89.7
Stredová vzdálenost:	332.0 mm	Pouzdro polozka c.:	--
Instalacní tolerance:	297.5 mm az 332.8 mm	Díra:	--
		Roztečný prumer:	--
		Hnací	24-8M-30
		Hnaný	24-8M-30
			60.00 mm
			0 g
			1.3 m/s
			400.0
			1108*22MM
			9 mm - 28.6 mm
			61.12 mm
NAPETÍ		Nový remen	
Pruhyb na drážku/zebro:	6.64 mm	Použitý remen	6.64 mm
Síla v pruhybu na drážku/zebro:	36 az 38 N		29 az 31 N
Sonic - meric napetí			
Frekvence remene:	61 az 64 Hz		51 az 54 Hz
Pokud plánujete demontáž použitých remenu, zmerte a zaznamenejte napetí pred demontáží a napnete remen na puvodní napetí.			
POZNÁMKY			
- V návrzích převodu z Design Flex Pro je počítáno pouze s Gates produkty a nejsou použitelné na produkty jiných výrobců. - Výrobky Gates nejsou určené k použití na strojích, kde selhání výrobku může vést k ublížení na zdraví nebo k smrti. Toto zahrnuje použití pohonech leteckých vrtulí a rotoru, nebo souvisejících pomocných pohonech.			

Příloha č. 5 Kontrola řemenového převodu pro podélnou soustavu



Návrh řemenového převodu - Detaily pohonu

Design Flex® Web by the Gates Corporation

Navrženo pro: Jakub Misak TU of Liberec Jachymovska 248 Liberec, XX 46010 Czech Republic jakub.misak@tul.cz 00420603943553 Telefon		Zajistuje: Design Flex® Web Gates Corporation	
Aplikace: Design #1			
VSTUP			
Info. o pohonu Pomer otáček: 2.00 Do pomala Výkon motoru: 0.25 Provozní faktor: 1.4 Konstr. výkon: 0.35 kW Středová vzdálenost: 288 mm +/-10%		Otáčky za minutu: 60.0 Prumer hrdele: 20 mm Hnací: 60.0 Hnaný: 30.0 +/-4% 25 mm Kontrolovaná pouzdra: Zádná Kontrolované remeny: PowerGrip GT3, PowerGrip HTD	
ZVOLENÝ POHON			
Typ remene: PowerGrip GT3 - 8M		Remen Díl c.: 880-8MGT3-30 Produkt c.: 9356-50325 Horní sírka: -- Hmotnost převodu: 153 g Obv. rychl. m/s: 0.2 m/s Otáčky za minutu: 12.0 Pouzdro polozka c.: -- Díra: -- Roztečný prumer: --	
Pomer otáček: 2.00 Do pomala Rychlost hnaná: 30.0 Nominální výkon: 0.46 kW Na hrdele: 1823 N Středová vzdálenost: 306.7 mm Instalací tolerance: 271.7 mm az 307.5 mm		Hnací: 22-8M-30 Hnaný: 44-8M-30 60.00 mm 0 g 0.2 m/s 60.0 30.0 1008*20MM 9 mm - 25.4 mm 56.02 mm 60.00 mm 60.00 mm 0 g 0.2 m/s 30.0 2012*25MM 14 mm - 50.8 mm 112.0 mm	
NAPETÍ			
Pruhyb na drážku/zebro: 6.11 mm Sila v pruhybu na drážku/zebro: 82 az 89 N Sonic - meric napeti Frekvence remene: 115 az 121 Hz		Nový remen: 6.11 mm Použitý remen: 61 az 68 N 6.11 mm 61 az 68 N 97 az 103 Hz	
Pokud plánujete demontáž použitých remenu, zmerte a zaznamenejte napeti pred demontázi a napnete remen na puvodní napeti.			
POZNÁMKY			
- V návrzích převodu z Design Flex Pro je počítáno pouze s Gates produkty a nejsou použitelné na produkty jiných výrobcu. - Výrobky Gates nejsou určené k použití na strojích, kde selhání výrobku může vést k ublížení na zdraví nebo k smrti. Toto zahrnuje použití pohonech leteckých vrtulí a rotoru, nebo souvisejících pomocných pohonech.			

Příloha č. 6 Vizualizace budoucího zařízení při údržbě

